

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

PATRICIA HEPP

AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE TENSÕES RESIDUAIS NA
MONTAGEM DE CONECTORES DE DUTOS FLEXÍVEIS

Porto Alegre

2020

PATRICIA HEPP

AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE TENSÕES RESIDUAIS NA
MONTAGEM DE CONECTORES DE DUTOS FLEXÍVEIS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski

Porto Alegre

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitor: Patrícia Helena Lucas Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Carla Schwengber ten Caten

Vice-Diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS

Coordenador: Afonso Reguly

Vice Coordenador: Andréa Moura Bernardes

PATRICIA HEPP

AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE TENSÕES RESIDUAIS NA
MONTAGEM DE CONECTORES DE DUTOS FLEXÍVEIS

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Bancada Examinadora designada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski

Prof. Dr. Afonso Reguly

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Joseane Ortiz Breitenbach Canterle (Dr.) – UFRGS

Toni Roger Schifelhain de Lima (Dr.) – UFRGS

Prof. Adriano Scheid (Dr.) – UFPR

AGRADECIMENTOS

Ao professor Telmo Strohaecker (in memoriam), por transformar o LAMEF em um laboratório de excelência e dar a primeira oportunidade junto ao mesmo.

Ao professor Carlos Fortis Kwietniewski, pela orientação posterior.

Aos colegas e amigos do grupo de Tecnologia Submarina e de todo o LAMEF pela convivência e auxílio nos ensaios.

À Petrobras por apoiar a pesquisa e desenvolvimento no país.

Agradeço a toda a minha família, especialmente aos meus pais pelo apoio para continuar melhorando sempre.

RESUMO

A gestão da integridade estrutural de dutos flexíveis é fundamental para o avanço da exploração de petróleo e gás em águas profundas e ultraprofundas. Tais dutos possuem uma estrutura complexa composta de várias camadas concêntricas sobrepostas formadas por fios de aço enrolados lado a lado, com função estrutural, e camadas poliméricas extrudadas para garantir a vedação. Para permitir a interligação destes dutos, em suas extremidades, são instalados conectores, os quais, em sua configuração convencional, incluem, durante a montagem, uma etapa de dobramento e posterior retorno dos fios da armadura de tração. Essa mudança de geometria ocorre em uma seção sujeita a grandes esforços, sendo um dos principais pontos de falha deste tipo de acessório, tendo causado, inclusive, falhas em campo. Para melhor prever a vida do duto, é importante o estudo desse processo, bem como determinar as tensões residuais presentes no fio de aço da armadura de tração. O objetivo deste trabalho foi investigar o processo de montagem dos conectores a partir de uma abordagem numérica e experimental para o efeito do raio de dobramento sobre as tensões residuais e raio de dobramento residual de fios de tração em dutos flexíveis, sendo que foram avaliados diferentes gabaritos de dobramento. Os resultados mostraram que há uma variação considerável nas tensões residuais em função das condições de dobramento dos fios, sendo que, com aumento do raio do gabarito, ocorre uma redução importante na magnitude destas tensões, e aumento do raio residual.

Palavras-chave: Dutos flexíveis. Tensões residuais. Elementos finitos.

ABSTRACT

The management of structural integrity of flexible pipes is critical to advance oil and gas exploration in deep water. These pipes have a complex structure composed of several overlapping concentric layers formed by side-by-side coiled steel wires, with structural function, and extruded polymeric layers, to ensure seal. To allow interconnection of these pipes, at their ends, connectors are installed, which, in a conventional configuration during assembly including a folding step and subsequent return of tensile armor wires. This change of geometry occurs in a section subjected to great efforts, being one of the main points of failure of this type of accessory, having even caused, field failures. To better predict the life of pipe, is important to study this process, and to know the residual stresses present in steel wire of the tensile armor layer. The objective of this work was to investigate the process of assembling the connectors from a numerical and experimental approach to the effect of the bending radius on residual stresses and residual bending radius of tensile wires in flexible pipes, with different folding collars being evaluated. The results showed that there is a considerable change in the residual stresses, where, with an increase in the radius of the collar, there was reduction of residual stress, and increase of residual radius.

Keywords: Flexible pipes. Residual stresses. Finite elements

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de produção flutuante.	18
Figura 2 - Camadas de um duto flexível típico.	21
Figura 3 - Perfil de carcaça intertravada.	22
Figura 4 - Perfis da armadura de pressão: (a) perfil Z, (b) perfil C, (c) e (d) perfis T.	23
Figura 5 - Exemplo de conector da API RP 17B.	27
Figura 6 - Dobramento dos fios da armadura de tração.	28
Figura 7 - Duto <i>smooth bore</i> colapsado.	32
Figura 8 - Armadura de tração rompida próximo ao conector.	33
Figura 9 - Difração de raios X pelos planos de átomos.	36
Figura 10 - Dispositivo de dobramento.	38
Figura 11 - Razões de tensão no fio obtidas pelo autor. a) ângulo de dobramento máximo e b) configuração final depois da montagem do conector.	39
Figura 12 – Conceito da caixa bidimensional correspondente a seção do conector.	41
Figura 13 - Organograma do trabalho.	42
Figura 14 - Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material do fio da armadura de tração.	43
Figura 15 - Gabaritos de controle de curvatura. a) 16mm, b) 30mm, c) 50mm.	44
Figura 16 - Posicionamento do gabarito de controle de curvatura.	46
Figura 17 - Primeira etapa de dobramento sobre o gabarito de controle de curvatura.	47
Figura 18 – Terceira etapa do dobramento sobre o miolo do conector.	48
Figura 19 – Processo de análise do raio residual nos fios da armadura de tração.	49
Figura 20 - Difrátômetro de raios X.	49
Figura 21 – Corpos de prova para medição de tensões residuais.	51
Figura 22 - Pontos de medição do DRX.	51
Figura 23 – Montagem do modelo numérico tridimensional.	53
Figura 24 – Elementos utilizados. a) contínuo b) rígido	54
Figura 25 - Representação das etapas analisadas no modelo numérico.	56
Figura 26 – Comparação dos fios deformados nas etapas 2 e 4 para os diferentes gabaritos utilizados no modelo experimental, onde 1 – gabarito de 16mm, 2 – gabarito de 30mm e 3 – gabarito de 50mm.	57
Figura 27 - Raios de dobramento médios obtidos no modelo experimental para os três gabaritos avaliados nesta investigação e as duas etapas de dobramento, a barra vertical indica desvio padrão.	58
Figura 28 - Tensões residuais médias medidas na direção longitudinal no lado externo do fio para os três raios de gabaritos e duas etapas de retorno elástico, a barra vertical indica desvio padrão.	59
Figura 29 – Tensões residuais longitudinais médias medidas no lado interno do fio para os três raios de gabaritos e duas etapas de retorno elástico, a barra vertical indica desvio padrão.	60
Figura 30 – Comparação dos fios deformados nas etapas 2 e 4 para os diferentes gabaritos utilizados no modelo numérico, onde 1 – gabarito de 16mm, 2 – gabarito de 30mm e 3 – gabarito de 50mm.	62

Figura 31 - Raios de dobramento obtidos no modelo numérico em função dos diferentes raios dos gabaritos e etapa de deformação dos fios.	63
Figura 32 – Tensões residuais longitudinais médias no lado externo do fio para os três raios de gabaritos e duas etapas de retorno elástico.	64
Figura 33 - Tensões residuais longitudinais médias no lado interno do fio para os três raios de gabaritos e duas etapas de retorno elástico.	65
Figura 34 - Distribuição de tensões residuais longitudinais para os três gabaritos e duas etapas de retorno elástico, onde 1 – gabarito de 16mm, 2 – gabarito de 30mm e 3 – gabarito de 50mm.	66
Figura 35 - Comparação entre os raios obtidos no modelo experimental e numérico para os três gabaritos e etapas 2 e 4, a barra vertical indica desvio padrão.....	68
Figura 36 - Comparação entre as tensões residuais obtidas no lado externo do fio, no modelo experimental e numérico para os três gabaritos e etapas 2 e 4, a barra vertical indica desvio padrão.	69
Figura 37 - Comparação entre as tensões residuais obtidas no lado interno do fio, no modelo experimental e numérico para os três gabaritos e etapas 2 e 4, a barra vertical indica desvio padrão.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação dos corpos de prova.....	45
Tabela 2 - Parâmetros de medição.	50
Tabela 3 - Características da malha.....	55

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

API	<i>American Petroleum Institute</i> (Instituto Americano de Petróleo)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho assistido por computador)
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
DRX	Difratômetro/difratometria de raios X
FAT	<i>Factory Acceptance Test</i> (Teste de aceitação de fábrica)
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i> (Unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência)
GE	<i>General Electric</i>
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
HDPE	Polietileno de alta densidade
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
MDPE	Polietileno de média densidade
MPa	Megapascal
OLT	<i>Offshore Leak Test</i> (Teste de vazamento no mar)
PA	Poliamida
PVDF	Fluoreto de polivinilideno
RP	<i>Recommended Practice</i> (Prática recomendada)
S	<i>Stress</i> (Tensão)
SN	<i>Stress x Number of cycles to failure</i> (Tensão x Número de ciclos até a falha)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
XLPE	Polietileno reticulado
σ	Tensão
σ_{ba}	Tensão de flexão lateral no plano binormal causada pela variação do ângulo de assentamento dos fios
σ_{bt}	Tensão de flexão causada pela variação de curvatura no plano binormal
σ_{CT}	Tensão nos fios no corpo tubular próxima ao conector
σ_{EF}	Tensão nos fios dentro do conector

σ_n	Tensão de flexão causada pela variação de curvatura no plano normal
σ_{res}	Tensão residual resultante da montagem do conector

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	SISTEMA DE PRODUÇÃO.....	17
2.2	DUTOS FLEXÍVEIS	19
2.2.1	Estrutura de um duto flexível	21
2.2.1.1	<i>Carcaça intertravada</i>	21
2.2.1.2	<i>Camada de estanqueidade</i>	22
2.2.1.3	<i>Armadura de pressão</i>	23
2.2.1.4	<i>Armadura de tração</i>	24
2.2.1.5	<i>Camada polimérica externa</i>	25
2.2.1.6	<i>Camadas adicionais</i>	25
2.2.2	Acessórios	26
2.2.2.1	<i>Enrijecedores de curvatura (bend stiffeners)</i>	26
2.2.2.2	<i>Conectores (end fittings)</i>	26
2.3	MONTAGEM DO CONECTOR	27
2.4	MODOS DE FALHA	30
2.5	TENSÕES RESIDUAIS.....	34
2.5.1	Medição de tensões residuais	34
2.5.2	Difração de raios X (DRX)	35
2.6	MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA A DUTOS FLEXÍVEIS	37
3	METODOLOGIA	42
3.1	MODELO EXPERIMENTAL.....	42
3.1.1	Dispositivos de ensaio	43
3.1.2	Etapas do ensaio	44
3.1.3	Realização do ensaio	45
3.1.4	Medição de tensões residuais	49
3.2	MODELO NUMÉRICO	52
3.2.1	Geometria	52
3.2.2	Modelo	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	MODELO EXPERIMENTAL.....	57
4.1.1	Raio residual	58
4.1.2	Tensões residuais	59

4.2	MODELO NUMÉRICO.....	61
4.2.1	Raio residual	62
4.2.2	Tensões residuais	63
4.3	DISCUSSÃO.....	67
5	CONCLUSÃO	72
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Apesar da expansão do uso de energias renováveis, o petróleo ainda tem uma importância vital na matriz energética mundial. No Brasil, com o avanço da tecnologia e incentivo, tornou-se possível a descoberta e exploração de campos de produção mais profundos e afastados. Os campos descobertos na camada do pré-sal elevaram o país a um novo patamar na produção mundial de petróleo.

Porém, com o avanço da exploração de petróleo e gás para águas profundas e ultraprofundas, surgem novos desafios para a indústria, fazendo-se necessário o aprimoramento das tecnologias existentes. Uma questão crítica nesse ponto é a gestão da integridade estrutural dos dutos flexíveis.

Desde o início da exploração de óleo e gás em águas profundas no Brasil, os dutos flexíveis foram considerados a melhor opção para o transporte de fluido de instalações *offshore*. Em relação aos dutos rígidos, os flexíveis são mais fáceis de manusear, transportar, instalar e operar. Além disso, podem ser facilmente recuperados e reinstalados (MARINHO et al., 2007).

Com a exploração do pré-sal, surgem novos desafios para a indústria, principalmente manter a integridade estrutural e vida em fadiga de dutos flexíveis, mesmo com a utilização de linhas de maior comprimento. Adicionalmente, existem novas dificuldades em relação a contaminantes, como o dióxido de carbono (CO₂) e o sulfeto de hidrogênio (H₂S) que reduzem a vida útil dos dutos.

Dutos flexíveis são utilizados, em larga escala, devido a uma combinação ímpar de propriedades mecânicas garantidas pela sua estrutura de perfis metálicos assentados sobre camadas concêntricas de tubos poliméricos. As camadas metálicas possuem função estrutural de suporte às forças de pressão e tração, enquanto as camadas poliméricas funcionam como vedação entre o meio interno e o externo. Tais camadas operam em conjunto, mas de forma independente, conferindo resistência mecânica e estanqueidade ao conjunto, sem comprometer a flexibilidade do duto. A expectativa é que esses dutos trabalhem muitos anos sob as difíceis condições marinhas com o mínimo de manutenção.

O processo de fabricação de dutos flexíveis é extremamente automatizado e tem um rígido sistema de controle de qualidade, com o intuito de manter a conformidade com o projeto. Para a utilização em campo, a fim de permitir sua interligação com outros tramos ou estruturas, faz-se necessária a montagem de

conectores nas extremidades das linhas. O conector é montado junto à extremidade do duto e tem sua selagem primária na camada de vedação interna, sendo que para acessá-la é necessário realizar o dobramento e posterior desdobramento, de forma manual e quase artesanal, dos fios constituintes da armadura de tração que, além das mudanças de geometria, torna o processo de difícil controle.

O processo de fabricação de linhas flexíveis insere um nível de tensões residuais nas camadas metálicas, mas o faz de forma uniforme em todo o comprimento do duto. Já o dobramento dos fios da armadura de tração gera uma mudança na geometria e uma concentração local de tensões na seção de entrada do conector. O estado de tensões residuais em um componente está entre os parâmetros de maior influência no seu comportamento em serviço, particularmente em relação a materiais de alta resistência mecânica. O histórico de dutos mostra falhas ocorridas na entrada do conector, justamente na seção que passou por esse processo de deformação plástica para a montagem, evidenciando que essa é uma região crítica do sistema.

Este trabalho tem como objetivo principal a concepção de um modelo experimental, replicando a montagem de um conector de campo com uma seção de duto flexível, preservando o formato original dos fios da armadura de tração e realizando a medição de tensões residuais através da técnica de difração de raios X (DRX). Um modelo numérico tridimensional de elementos finitos em condições semelhantes também foi desenvolvido para fins de comparação e um melhor entendimento da distribuição de tensões residuais desenvolvidas ao longo do processo de dobramento.

Além disso, como objetivo específico, pretende-se avaliar a influência do raio do gabarito de dobramento, empregado na montagem do conector, no estado de tensões residuais, construindo-se modelos experimentais e numéricos.

A determinação mais precisa das tensões residuais presentes nos fios da armadura de tração, bem como a influência gerada pelo gabarito utilizado durante o dobramento dos fios, podem ser utilizadas para o aprimoramento de modelos de vida em serviço dos dutos flexíveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os desafios inerentes à exploração da camada do pré-sal geram uma necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias e o aprimoramento daquelas já existentes. O projeto confiável de dutos flexíveis de camadas não aderidas deve incluir aspectos chave como: aumentar a resistência ao colapso devido ao aumento da pressão hidrostática em águas profundas, gestão do peso, melhoria da capacidade de instalação em águas profundas, alcance suficiente da vida em fadiga, gestão de integridade dos dutos, introdução de novos critérios de projeto para camadas estruturais, novos critérios de dimensionamento da capacidade de carga para conectores, projeto para águas ultraprofundas na área do pré-sal, camada anti-H₂S e utilização de camadas de compósitos (SHEN; JUKES, 2015).

As principais normas regulamentadoras do setor de óleo e gás são da API (American Petroleum Institute). Para dutos flexíveis, destacam-se a API RP 17B – “*Recommended Practice for Flexible Pipe*” e API 17J – “*Specification for Unbonded Flexible Pipe*” (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008, 2014).

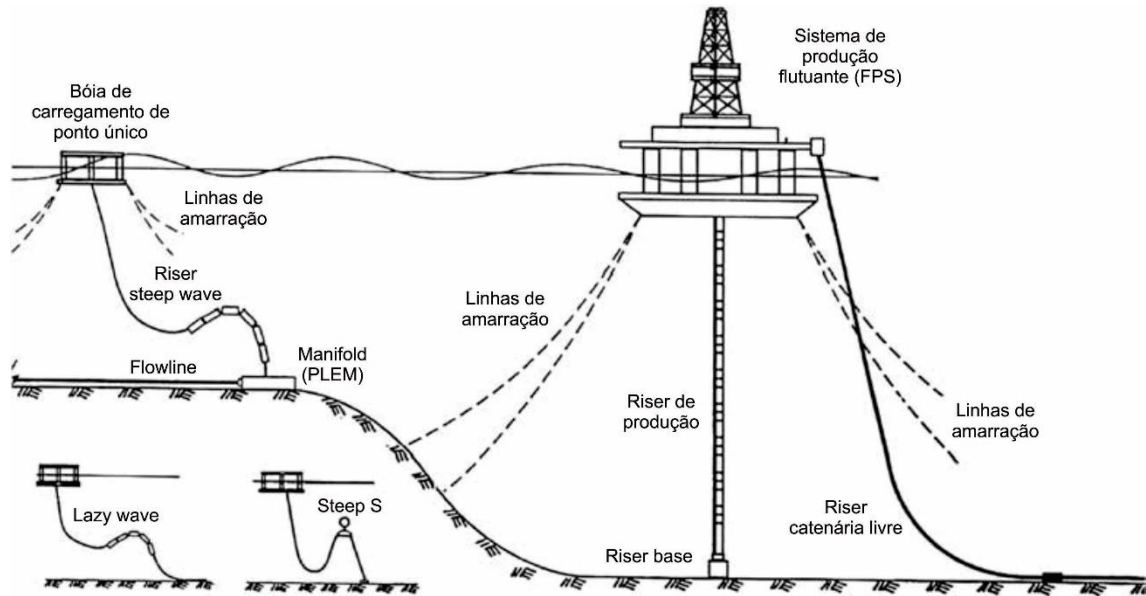
2.1 SISTEMA DE PRODUÇÃO

O foco da indústria *offshore* brasileira atualmente é o pré-sal e a exploração em águas ultraprofundas. Para tanto, os componentes do sistema de produção precisam se adequar às condições adversas encontradas.

Para lâminas de água de mais de 2.000 metros, as plataformas empregadas são do tipo semissubmersível, FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*) e FPSO monocoluna. FPSOs tem se mostrado eficientes para os projetos atuais, sendo caracterizadas por uma plataforma flutuante, convertida a partir de navios. É ancorada ao solo marinho, e possui como vantagem uma maior capacidade de armazenamento, o que permite que opere a grandes distâncias da costa, onde a construção de oleodutos se torna inviável (PETROBRAS, 2017).

A parte submarina de um sistema de produção é bastante complexa, constituída de *manifolds*, umbilicais, diferentes dutos, entre outros. A Figura 1 mostra uma representação esquemática de um sistema de produção flutuante com alguns equipamentos submarinos.

Figura 1 - Esquema de produção flutuante.



Fonte: Adaptado de BAI; BAI; RUAN (2017)

O *manifold* submarino é uma grande estrutura que combina o fluxo de vários dutos em um, muito usado para reunir o fluxo de poços separados em uma linha que leva até a plataforma. Os umbilicais são dutos constituídos de diversas pequenas linhas hidráulicas e/ou de sinal elétrico. São empregados para a operação de válvulas submarinas, compressores e outras funções, sendo que também transmitem dados dos instrumentos de pressão e temperatura (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Os dutos são os responsáveis pelo escoamento de óleo e gás natural e injeção de água e gás. O uso de dutos flexíveis, frente aos rígidos, permite a escolha de rotas em arranjos submarinos lotados e reduzem o custo de instalação. Conforme a utilização do duto, este possui uma designação específica, sendo que os dutos de aplicação dinâmica, que ligam o fundo do mar ao sistema flutuante de produção são chamados de *risers*. Quando possuem aplicação estática, são conhecidos como *flowlines*, sendo que ficam assentados sobre o fundo do mar para escoar óleo e gás em grandes distâncias ou injetar água no reservatório. *Jumpers* são dutos flexíveis de transporte de comprimento curto (DE SOUSA, 2005; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Há diferentes tipos de arranjos submarinos para unir os *risers* flexíveis entre a plataforma e o fundo do mar, como mostrado na Figura 1, sendo as configurações mais comuns a de catenária livre, *steep wave*, *lazy wave* e *steep S*. A configuração em catenária livre é a mais simples e de menor custo, pois não necessita de

acessórios como boias, utilizadas nos demais, sendo que por isso há uma preferência pelo seu uso sempre que possível. Porém, é a que mais exige do conector de topo ligado à plataforma.

O projeto de um sistema de dutos flexíveis é um processo interativo que envolve projeto estático da seção transversal do duto, combinado com uma análise da configuração do sistema. A análise da seção transversal determina a capacidade de resistência em relação à pressão interna, cargas externas, temperatura e composição do fluido. Esses dados são usados como entrada de um sistema de análise de configuração, onde o duto é avaliado sob todas as combinações de carregamento, funcionalidade, meio de produção e eventuais acidentes (BRAESTRUP et al., 2005).

2.2 DUTOS FLEXÍVEIS

Um duto flexível é construído usando um material polimérico impermeável que contém o fluido do tubo, camadas de armaduras múltiplas que fornecem a resistência necessária, e uma camada polimérica externa que previne a interação da água do mar com fios das armaduras. Essas camadas trabalham juntas, mas de forma independente, oferecendo assim resistência e uma estrutura à prova de vazamento sem comprometer a flexibilidade (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014; VAZ; RIZZO, 2011).

Dutos flexíveis têm como principal vantagem a habilidade de trabalhar sob condições dinâmicas extremas e ainda manter boas propriedades de isolamento e compatibilidade química em relação a dutos rígidos de aço carbono. O tipo de estrutura permite a conexão permanente entre uma embarcação de suporte flutuante com grandes movimentos e instalações submarinas, sendo que o transporte e a instalação são simplificados devido à possibilidade de pré-fabricação dos dutos em longos comprimentos que podem ser armazenados em bobinas, o que facilita o manuseio. Além disso, são usados em múltiplas funções, que incluem a produção e a exportação de hidrocarbonetos fluidos, injeção de gás, água e químicos dentro do reservatório e linhas de serviço para a cabeça de poço (BRAESTRUP et al., 2005; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Cada duto flexível é adaptado para um projeto específico, isto é, camadas e materiais são escolhidos dependendo do diâmetro interno requerido, composição do fluido interno, pressão e temperatura, necessidades de isolamento, do ambiente *offshore* e profundidade da lâmina de água (LEROY et al., 2010).

Quando o duto flexível possui uma carcaça intertravada como sua camada mais interna é conhecido como de parede rugosa (*rough bore*), e utilizado para transporte de fluidos que contenham gases. A carcaça previne o colapso que pode ser ocasionado por uma queda brusca na pressão interna (DE SOUSA, 2005). Os dutos que não possuem carcaça intertravada são chamados de parede lisa (*smooth bore*), com uma camada mais interna polimérica, podendo inclusive conter uma camada de vedação intermediária. É uma opção para o transporte de fluidos que não contêm gás, como aqueles de injeção de água, pois possui menor resistência ao escoamento e custo reduzido (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Podemos ainda classificar os dutos em relação à condição de suas camadas, ou seja, dutos de camadas aderidas (*bonded*) ou não aderidas (*unbonded*). Os tubos *bonded* são aqueles com várias camadas enroladas ou extrudadas individualmente e depois ligadas entre si através do uso de adesivos ou por aplicação de calor e/ou pressão para fundir as camadas numa única construção (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008). Os dutos de camadas não aderidas não têm suas camadas coladas, sendo que cada componente constitui uma camada cilíndrica, capaz de deslizar em relação às demais (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Visando a redução global de custo de dutos flexíveis, os fabricantes estão desenvolvendo dutos em materiais compósitos, que além de disporem de elevada resistência mecânica, proporcionam uma redução de peso significativa. Um dos conceitos abordados é a utilização de um duto de camadas aderidas, onde uma camada de compósito, comumente fibra de carbono ou aramida, em uma matriz polimérica é empregada (ECHTERMEYER; STEUTEN, 2013; WILKINS, 2016). Para a qualificação desse tipo específico de duto, foi escrito o guia de práticas recomendadas DNVGL-RP-F119 (DNV, 2015). Em outros conceitos desenvolvidos, a estrutura geralmente utilizada em dutos flexíveis de camadas não aderidas é mantida, porém camadas de aço como a armadura de pressão e a de tração são substituídas por camadas de material compósito (JHA et al., 2015).

2.2.1 Estrutura de um duto flexível

Nos itens a seguir, é apresentada uma descrição das camadas geralmente presentes em dutos flexíveis. A Figura 2 mostra um duto de camadas não aderidas e construção *rough bore*.

Figura 2 - Camadas de um duto flexível típico.



Fonte: A AUTORA, 2020

2.2.1.1 Carcaça intertravada

A carcaça é uma construção metálica intertravada usada como a camada mais interna de um duto *rough bore*, sendo o único componente metálico não estanque em contato direto com o fluido (ver Figura 3). O propósito da carcaça intertravada é prevenir o colapso devido a uma eventual descompressão do duto, resistir a carregamentos externos como esmagamento e pressão hidrostática, e servir de proteção à camada polimérica interna. Pode ser projetada contra ovalização excessiva, colapso, escoamento, abrasão e erosão (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2014; BRAESTRUP et al., 2005; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Figura 3 - Perfil de carcaça intertravada.



Fonte: A AUTORA, 2020

A construção da carcaça intertravada possui um elevado ângulo de assentamento dos fios, isto é, próximo de 90° , em relação ao eixo longitudinal do duto. Essa característica confere grande resistência a cargas radiais, porém baixa rigidez axial, não sendo adequada para carregamentos longitudinais. Por permanecer em contato com o fluido interno, o aço utilizado na fabricação deve possuir boa resistência à corrosão (DE SOUSA, 2005).

Um novo tipo de carcaça é sugerido por Nielsen *et al.* (2011), onde o perfil do fio possui a forma de K, que aumenta a rigidez axial e a capacidade de colapso do duto. Uma característica importante desse modelo é que a força compressiva axial é absorvida pela carcaça em vez das armaduras de tração, sendo a solução para problemas de flambagem radial associados a dutos empregados em águas profundas.

2.2.1.2 Camada de estanqueidade

A camada de estanqueidade é a camada polimérica mais interna que serve de barreira estanque do duto flexível, sendo que é fabricada a partir de um termoplástico por extrusão sobre a carcaça. Em dutos *rough bore*, esta camada está localizada após a carcaça intertravada, enquanto que em dutos *smooth bore* esta é a mais interna. O espaço compreendido entre a camada de estanqueidade e a camada polimérica externa é chamado de anular.

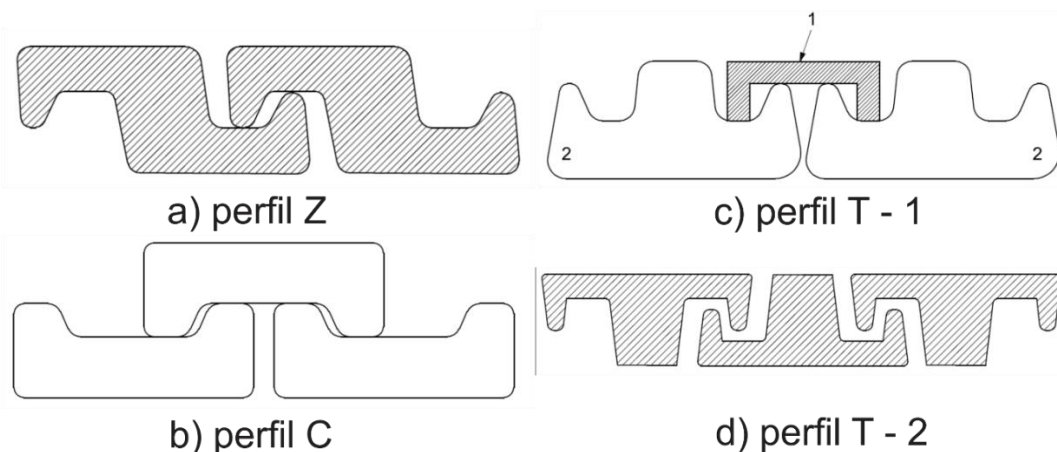
O critério principal para a escolha do material de fabricação é a temperatura de operação, sendo os mais utilizados certos graus específicos de polietileno (HDPE, XLPE), poliamida (PA11, PA12) e fluoreto de polivinilideno (PVDF). O número limitado de materiais poliméricos disponíveis para dutos flexíveis é consequência dos

requisitos de extrusão em larga-escala e problemas associados à degradação em função do tempo do material no equipamento de extrusão (BRAESTRUP et al., 2005; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

2.2.1.3 Armadura de pressão

A armadura de pressão garante resistência radial necessária para resistir às cargas de pressão interna, esmagamento externo devido ao manuseio ou carregamento acidental, e cargas de pressão hidrostática. Além disso, a armadura de pressão pode ser projetada para suportar a estrutura da camada de estanqueidade e da carcaça para aumentar a capacidade de colapso do duto. É fabricada a partir de fios ou tiras metálicas enroladas helicoidalmente com um grande ângulo em relação ao eixo longitudinal do duto, sendo que os perfis mais comuns estão apresentados na Figura 4. Geralmente, é fabricada de aço carbono com alta resistência ao escoamento, tipicamente da ordem de 800-1.000 MPa (BRAESTRUP et al., 2005; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Figura 4 - Perfis da armadura de pressão: (a) perfil Z, (b) perfil C, (c) e (d) perfis T.



Fonte: Adaptado de AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008.

A interligação da armadura de pressão é um fator limitante para o raio mínimo de dobramento do duto flexível. Se esse limite for excedido, danos irreversíveis à linha podem ocorrer, levando à perfuração da camada de estanqueidade quando sujeito à pressão interna (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

2.2.1.4 Armadura de tração

As armaduras de tração estão presentes nos dutos em número par de camadas, sendo geralmente duas. As camadas são compostas de vários fios de seção transversal praticamente retangular conformadas sobre as camadas anteriores. Os fios são enrolados em sentidos contrários, e em pares para obter o melhor balanço torcional possível no projeto do duto. A construção possui pequeno ângulo de assentamento em relação ao eixo longitudinal do duto, normalmente entre 25° e 35°, suficiente para que não se comprometa a flexibilidade característica do duto (BRAESTRUP et al., 2005; DE SOUSA, 2005).

Geralmente, são fabricadas de aço alto carbono com alta resistência ao escoamento, tipicamente da ordem de 700-1.500 MPa. O fator determinante para o uso ou não de um aço de alta resistência é a condição de serviço a que os fios são submetidos, especialmente quando o contaminante H₂S está presente. Sua função é resistir às cargas axiais provenientes do peso próprio do duto, cargas de terminação, carregamentos de tração externos e à pressão interna (BRAESTRUP et al., 2005; DE SOUSA, 2005). No entanto, para as cargas de torção numa direção que leva ao desenrolamento da camada exterior de armadura, a resistência e a rigidez são reduzidas (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Alternativas vêm sendo estudadas para a substituição das armaduras de aço. De fato, o contínuo aumento da profundidade de produção, que torna os dutos muito pesados e a presença de contaminantes em elevada concentração, como o CO₂, muito comum no pré-sal brasileiro, demanda o desenvolvimento de materiais alternativos. A fibra de carbono é uma opção para essas aplicações, porque de fato este compósito é mais resistente e mais leve do que o aço, ao mesmo tempo em que não é sensível à corrosão por ingresso de água do mar, resultado de danos na capa externa ou difusão de fluidos corrosivos a partir do núcleo (*bore*) do duto. Para validar esses novos conceitos, foram realizados ensaios em escala real simulando as condições do pré-sal brasileiro (DO et al., 2014; DO; BERNARD; HANONGE, 2013). De qualquer forma, dutos flexíveis com a armadura de tração em fibra de carbono ainda não foram qualificados totalmente e muitos testes ainda precisam ser realizados para que esta tecnologia pode ser empregada pela indústria.

Padilha (2009) analisou a opção da mudança do material das armaduras para ligas de titânio, que possuem alta resistência à tração, elevada vida em fadiga, boa

resistência à corrosão e maior flexibilidade. No entanto, a grande desvantagem ainda é seu custo elevado.

2.2.1.5 Camada polimérica externa

A camada polimérica externa, ou simplesmente capa externa, previne que os fios de aço de um duto flexível entrem em contato direto com a água do mar, evitando assim a corrosão, além de garantir “proteção mecânica” à armadura de tração externa. Normalmente, esta camada é fabricada através da extrusão de polietileno (MDPE) ou poliamida (PA11) sobre a armadura de tração externa. O polímero PA11 é tipicamente o material empregado em *risers* devido a sua relativa boa resistência mecânica, enquanto o MDPE é o mais usado em aplicações estáticas como *jumpers* e *flowlines*. Cerca de 40% das falhas em *risers* estão relacionados a danos na camada externa, sendo que muitas destas ocorrem durante a instalação (BRAESTRUP et al., 2005; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

2.2.1.6 Camadas adicionais

Outras camadas podem ser aplicadas para melhorar o desempenho de dutos flexíveis, obtendo-se assim propriedades exigidas em cada aplicação específica.

Em um duto flexível sujeito à flexão cíclica, os fios das armaduras de aço deslizarão em relação às camadas adjacentes, desenvolvendo uma tensão de contato significativa. As fitas antiatrito são empregadas entre as camadas metálicas para separar e reduzir o atrito, melhorando o desempenho em fadiga de um duto, sendo que a fita não é a prova de vazamentos (BRAESTRUP et al., 2005; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Um duto flexível é vulnerável a carregamentos de torção e compressão axial, porque de fato estes tipos de solicitações mecânicas podem levar à flambagem radial ou desorganização das camadas da armadura de tração. Por isso, uma fita antinflambagem é posicionada no lado de fora da armadura de tração externa. Fibra de vidro reforçada ou aramida é empregada para esse propósito (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014; VIDIGAL et al., 2017).

Dutos flexíveis têm boas propriedades de isolamento térmico em relação a dutos rígidos devido a suas camadas poliméricas e à construção da seção transversal.

Mesmo assim, pode ser necessário isolamento adicional, como para *flowlines* longos ou *risers* em aplicações de águas profundas. Essa camada de isolamento é localizada externamente às armaduras de tração, geralmente entre duas camadas da capa externa (BRAESTRUP et al., 2005; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Para atender aos novos desafios de desempenho estrutural, aços mais resistentes precisam ser empregados. No entanto, esses são mais suscetíveis a problemas, como a fragilização por sulfeto, hidrogênio e corrosão sob tensão, devido a gases contaminantes. Nestes casos, é utilizada uma camada polimérica extra, anti-H₂S, por exemplo, que previne a permeação dos gases do interior do duto para o espaço anular (VIDIGAL et al., 2017).

2.2.2 Acessórios

Conectados aos dutos, estão uma série de componentes auxiliares que visam executar uma ou mais das seguintes funções: controlar o comportamento do duto flexível, evitar uma curvatura excessiva, proteger ou reparar o duto, prover união, transição estrutural e vedação entre o duto flexível e as estruturas próximas (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2014).

2.2.2.1 Enrijecedores de curvatura (*bend stiffeners*)

Os enrijecedores de curvatura costumam estar presentes no final de dutos empregados em aplicações dinâmicas. É uma estrutura com exterior cônico que aumenta gradualmente em raio e rigidez em flexão ao longo de uma pequena seção de comprimento (BRAESTRUP et al., 2005). Grandes efeitos de flexão podem ocorrer próximo ao conector devido à junção de elementos rígidos e flexíveis, sendo que o enrijecedor é projetado para proteger o duto de uma flexão excessiva e garantir uma transição gradual entre o conector rígido e o duto flexível (DONG et al., 2016; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

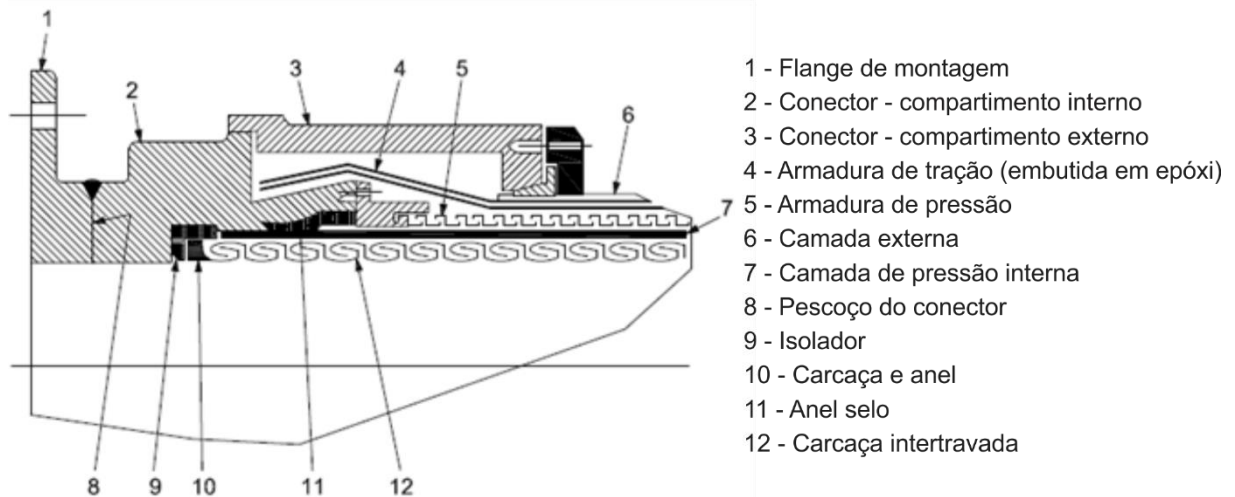
2.2.2.2 Conectores (*end fittings*)

Um conector é projetado para fixar cada camada de um duto flexível completamente para que a carga seja transferida adequadamente, mantendo-se assim a integridade da vedação interna.

Todos os elementos de resistência na construção de um duto flexível são terminados em um conector, de modo que cargas axiais e momentos de flexão possam ser transmitidos adequadamente para o conector de extremidade. Em águas profundas, cargas dinâmicas de tração significativas podem ocorrer devido a forças de arrasto tangencial ao longo da linha flexível (DONG et al., 2016).

O conector é uma parte crítica de um duto flexível. Uma zona de transição bem projetada é necessária para convergir as camadas do duto em uma peça que transmite todos os esforços. Um exemplo de conector presente na API RP 17B é mostrado na Figura 5 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008).

Figura 5 - Exemplo de conector da API RP 17B.



Fonte: Adaptado de AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008

2.3 MONTAGEM DO CONECTOR

No projeto de um conector típico, a vedação interna e a ancoragem da armadura de tração são feitas na mesma região. O processo de montagem, portanto, requer que os fios sejam dobrados para trás a fim de acessar a camada polimérica interna e ativar o sistema de vedação, a fim de se garantir a estanqueidade do sistema. Em seguida, os fios são dobrados de volta sobre o corpo do conector (CAMPELLO et al., 2012).

A montagem de um conector compreende várias etapas que devem ser realizadas para garantir a estanqueidade e uma ancoragem adequada da conexão do

duto flexível ao conector. Campello (2014) resume as etapas da montagem de um conector típico de dutos flexíveis:

- a. Corte da camada polimérica externa, soldagem e corte da armadura de pressão;
- b. Preparação da vedação externa;
- c. Dobramento dos fios da armadura de tração (ver Figura 6);
- d. Imobilização e corte da armadura de pressão;
- e. Preparação e realização da vedação interna;
- f. Acabamento dos fios da armadura de tração;
- g. Realização da vedação externa;
- h. Injeção da resina epóxi.

Figura 6 - Dobramento dos fios da armadura de tração.



Fonte: CAMPELLO, 2014

O desempenho estrutural de conectores de dutos flexíveis ainda é um gargalo tecnológico que precisa ser superado para o avanço da indústria de produção de óleo e gás. De fato, apesar do rigoroso controle de qualidade empregado na fabricação de um duto flexível, a montagem é realizada manualmente na fábrica ou plataforma, o que torna esse procedimento crítico para a vida útil do sistema (CAMPELLO *et al.*, 2012).

O procedimento de montagem envolve uma considerável deformação plástica no aço, o que acaba introduzindo tensões residuais nas armaduras de tração, na mesma região onde estas são mais solicitadas em serviço, isto é, na entrada do conector. Quando os fios da armadura de tração são tensionados, a curvatura devido à deformação plástica tende a ser endireitada e, conseqüentemente, altas tensões de

flexão surge na região na qual o fio foi previamente dobrado. Como tal concentração de tensões ocorre de maneira cíclica, a vida útil em fadiga do duto diminui significativamente levando a sua falha prematura (CAMPELLO *et al.*, 2012).

Para evitar a introdução de uma curvatura excessiva nos fios durante o dobramento, as operadoras de petróleo, especialmente a Petrobras, passaram a requerer o uso de gabaritos para o controle do raio de curvatura na montagem dos conectores de dutos flexíveis. Esses gabaritos podem ser removíveis, sendo usados somente na montagem ou permanentes (CAMPELLO, 2014).

A tensão de flexão da armadura de tração na entrada do conector depende da variação de curvatura, que é fortemente influenciada pelo raio do gabarito utilizado na montagem. Por isso, recomenda-se o uso de um colar gabarito com o maior raio possível (CAMPELLO; DE SOUSA; VARDARO, 2016).

Após a montagem do conector e antes de serem colocados em operação, os dutos passam por testes para verificar a estanqueidade. Ainda na fábrica, um teste de pressão hidrostática, *Factory Acceptance Test* (FAT), é realizado. Para *risers* e *jumpers* de topo, a pressão utilizada é 1,5 vezes a de projeto, e para *flowlines* e *jumpers* de fundo, 1,3 vezes a pressão de projeto (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2014).

Após a conclusão do encaixe e a conexão do duto ao poço, o sistema deve ser autorizado antes do início da produção. Para isso, é realizado outro teste hidrostático, *Offshore Leak Test* (OLT), no qual é utilizada 1,1 vezes a pressão de projeto do duto ou do sistema, o que for menor, associado ao peso do duto e tensões dinâmicas provenientes do movimento da unidade flutuante (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2014; CAMPELLO; DE SOUSA; VARDARO, 2016).

As altas pressões impostas ao duto durante os testes hidrostáticos podem modificar significativamente o estado de tensões residuais das armaduras de tração. Por isso, o estado de tensões residuais induzido pela montagem, os testes pré-operacionais, bem como as mudanças na geometria e a interação com a resina dentro do conector, devem ser levados em consideração nos cálculos de vida em fadiga de um duto flexível (CAMPELLO; DE SOUSA; VARDARO, 2016).

A tensão no fio dentro do conector (σ_{EF}) é dada de pela soma de diversas parcelas, como mostra a Equação (1).

$$\sigma_{EF} = \sigma_{CT} + \sigma_n + \sigma_{b\tau} + \sigma_{b\alpha} + \sigma_{res} \quad (1)$$

σ_{CT} é a tensão no corpo tubular próxima ao conector, σ_n é a tensão de flexão causada pela variação de curvatura no plano normal, $\sigma_{b\tau}$ é a tensão de flexão causada pela variação de curvatura no plano binormal, $\sigma_{b\alpha}$ é a tensão de flexão lateral no plano binormal causada pela variação do ângulo de assentamento dos fios e σ_{res} é a tensão residual resultante da montagem do conector (CAMPELLO, 2014).

Conforme calculado por Campello (2014), as parcelas de maior influência na tensão final dentro do conector são a tensão no corpo tubular (σ_{CT}) e a tensão residual (σ_{res}). A tensão no corpo tubular, apesar de ser a maior parte da parcela, é similar em todo o duto. No entanto, com o dobramento dos fios na entrada no conector, há uma modificação no estado de tensões desta seção, causando uma concentração local de tensões, que juntamente com demais fatores como mudança de rigidez do sistema, aumentam a possibilidade de falha nessa região.

Com o aumento da profundidade de operação de dutos flexíveis, aumenta também o nível de tensão na estrutura. O aumento de carga associado à concentração de tensões, devido a uma súbita alteração de rigidez entre o duto flexível e o conector, promove um processo de fadiga nas armaduras de tração na entrada do conector. A ruptura progressiva dos fios devido à fadiga pode ser acelerada pela corrosão, promovendo instabilidade na estrutura do duto flexível (MARINHO et al., 2007).

Apesar da grande influência do raio do gabarito de dobramento sobre as tensões residuais, o raio final do fio também é de grande interesse. A posição final, sobre o miolo do conector, é determinante na vida em serviço do duto. Nesse caso, além da influência do raio do gabarito, também há influência da altura e distância do miolo do conector a partir do ponto de dobramento dos fios das armaduras.

2.4 MODOS DE FALHA

O avanço da exploração de petróleo em águas profundas e ultraprofundas torna a integridade estrutural dos dutos flexíveis uma das maiores preocupações para os fabricantes. Por isso, a compreensão dos modos de falha é essencial na fase de projeto para que sejam levadas em consideração todas as variáveis relevantes. Já na

fase operacional, é essencial o monitoramento dos dutos para identificar possíveis danos e quantificar o risco de falhas (DE SOUSA, 2005; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

A complexa estrutura e a interação entre os diferentes materiais das camadas de um duto flexível podem levá-lo à falha por diversos motivos. Essa falha pode ser associada a problemas em apenas uma camada, várias camadas em conjunto e até mesmo em acessórios. A norma API RP 17B apresenta detalhes dos modos de falha potenciais desse sistema.

Para a aplicação em águas profundas, devido a alta pressão e a alta temperatura, os potenciais modos de falha de dutos de camadas não aderidas são (SHEN; JUKES, 2015):

- Integridade estrutural: tração e pressão;
- Interação do duto: conflito, interferência e emaranhamento;
- Dano em fadiga: curvatura e ciclos de pressão;
- Falhas na seção transversal: lacuna de polímero e fluência, envelhecimento; tensão na carcaça, armadura de pressão e armadura de tração; corrosão, fadiga, compatibilidade de material;
- Flambagem lateral, flambagem de *birdcaging*, flambagem de agitação;
- Estouro, colapso;
- Falhas relacionadas à fabricação;
- Falhas no enrijecedor de curvatura;
- Vibração induzida por fluxo de gás;
- Abrasão, erosão.

Contatos entre dutos flexíveis e a plataforma ou outro duto costumam ser detectados, especialmente em unidades semissubmersíveis devido ao movimento da plataforma. Além de promover danos à camada externa, se o duto não for reparado, um processo corrosivo pode se estabelecer com o decorrer do tempo, ao longo dos fios da armadura de tração. Essa corrosão pode causar a ruptura desses fios por mecanismos de corrosão-fadiga e/ou carregamento excessivo (sobrecarga) (MARINHO et al., 2007).

Birdcaging é um mecanismo de instabilidade que ocorre quando os fios da armadura de tração se deslocam predominantemente na direção radial. Geralmente, ocorre onde a camada externa é danificada e o anular está alagado, porque nessa

condição a pressão externa não suporta a expansão dos fios da armadura, mesmo que a carga compressiva axial diminua. Para evitar esse modo de falha, os dutos vêm sendo fabricados com uma fita de alta rigidez e alta resistência para suportar as armaduras (VAZ; RIZZO, 2011).

O colapso do duto leva a um bloqueio ou redução da seção do diâmetro interno, como mostra a Figura 7. Pode ser causado por tração excessiva, elevada pressão interna ou externa, grande ovalização inicial (defeito de fabricação), carregamento ou deformação excessiva durante a instalação, impacto lateral ou ponto de contato (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008). Alguns autores investigaram este tipo de colapso sob diversas condições, com efeitos de seções de dutos, carcaça com pré-carga axial, ovalização da carcaça, lacuna radial entre carcaça e a armadura de pressão e velocidade de aumento da pressão (AXELSSON; SKJERVE, 2014).

Figura 7 - Duto *smooth bore* colapsado.



Fonte: A AUTORA, 2020

Estudos realizados por Marinho *et al.* (2007) mostraram que a maioria dos danos ocorridos em dutos flexíveis em até 30 metros de profundidade foram na região próxima ao conector. O conhecimento adquirido na dissecação de dutos flexíveis de aplicação dinâmica mostra que há uma seção crítica para falhas dentro do conector (ver Figura 8), justamente a que está sujeita à deformação plástica proveniente do processo de montagem (CAMPELLO *et al.*, 2012).

Figura 8 - Armadura de tração rompida próximo ao conector.



Fonte: MARINHO et al., 2007

Os fios da armadura de tração podem se romper dentro do conector devido a problemas de carregamentos e fadiga. Os modos de falha típicos devido às condições de carregamento são (SHEN; JUKES, 2015):

- Carregamentos de tração e flexão;
- Dobramento devido ao efeito estrutural do conector;
- Dobramento brusco localizado devido ao processo de dobramento/desdobramento manual;
- Configuração do fio inclinado devido ao processo de dobramento/desdobramento manual;
- Forças de adesão associadas ao ancoramento físico do fio de tração pela resina epóxi;
- Tensão residual devido ao processo de dobramento e desdobramento durante a montagem.

Apesar de o rompimento ser um importante indicativo da deterioração, e ser um mecanismo de falha típico da seção de topo, a falha do duto só acontece depois da ruptura de um número significativo de fios, o que acaba produzindo um efeito cascata. Sousa *et al.* (2015) estudaram a resposta de 0 a 4 fios rompidos lado a lado, considerando um carregamento em tração pura e flexão combinada com tração. Os modelos mostraram um grande aumento da deformação nos fios vizinhos aos rompidos.

2.5 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são aquelas que permanecem no material após a fabricação e o processamento, na ausência de forças externas e variações térmicas. São geradas durante a maioria dos processos de fabricação envolvendo deformação do material, tratamento térmico, usinagem ou operações de processamento que transformam a forma ou alteram as propriedades de um material. Estas tensões também podem ser geradas por carregamento em serviço que promovem uma deformação plástica não homogênea. Em fadiga, o efeito das tensões residuais pode ser comparado com aquele observado para a concentração de tensões (ROSSINI et al., 2012).

O estado de tensões residuais em um componente está entre os parâmetros de maior influência no seu comportamento em serviço, particularmente em relação a materiais de alta resistência. Tensões residuais podem reduzir as cargas de escoamento ou colapso elástico e podem aumentar a suscetibilidade à fratura por corrosão sob tensão (LOHE; LANG; VÖHRINGER, 2002).

O conhecimento da distribuição de tensões residuais nos fios da armadura de tração é essencial para se estimar o efeito de tensões dinâmicas na estrutura, a máxima pressão permissível e ciclos aceitáveis de flexão dinâmica que podem ser aplicados ao duto durante a sua operação. Portanto, a determinação das tensões residuais nas armaduras de tração é crucial para um projeto eficiente e uma operação segura (FERNANDO et al., 2015).

2.5.1 Medição de tensões residuais

Há dois grupos principais de métodos de medição de tensões residuais, isto é, destrutivos e não-destrutivos.

Os métodos destrutivos são baseados na perturbação do estado de equilíbrio de tensões residuais através do corte, usinagem, remoção de camada ou furação da amostra. A redistribuição de forças internas leva a deformações locais que são medidas, e usando a teoria da elasticidade, pode-se avaliar o campo de tensões residuais. Os métodos mais comuns são o furo cego (*hole drilling*), seccionamento, curvatura e *ring core* (KLEIMAN; KUDRYAVTSEV, 2012).

Os métodos não-destrutivos são baseados na relação entre os parâmetros físicos e metalográficos e a tensão residual. Os métodos de difração como o de raios X (DRX) e nêutrons utilizam o espaçamento da rede cristalina como medidores de tensão. As técnicas ultrassônicas são baseadas na variação da velocidade de propagação da onda ultrassônica nos materiais sob a ação de tensões mecânicas. Também podem ser utilizados os métodos magnéticos que dependem da interação entre a magnetização e a deformação elástica em materiais ferromagnéticos (KLEIMAN; KUDRYAVTSEV, 2012).

Apesar dos vários métodos e técnicas disponíveis para a medição de tensões residuais, poucos podem ser aplicados em componentes de tamanhos diversos. Para estes, a técnica de difração de raios X e o método do furo cego com *strain gages* de resistência elétrica são os mais adequados. Embora diversos instrumentos de medição sejam portáteis, em alguns casos, pode ser necessária a remoção de uma seção do componente para se levar até o dispositivo de medição. Nestes casos, deve-se ter cautela durante o seccionamento, porque este pode provocar uma mudança no campo de tensões residuais. O método do furo cego possui algumas limitações, isto é, necessita de uma preparação da superfície de medição, esta superfície deve ser acessível ao equipamento de perfuração e os resultados se tornam não lineares quando a tensão residual medida é maior do que a metade do escoamento (RUUD, 2002).

2.5.2 Difração de raios X (DRX)

A técnica de DRX explora o fato de que em um metal sob tensão, seja ela aplicada ou residual, a deformação elástica residual causa mudança no espaçamento dos planos atômicos da estrutura cristalina. O método pode medir diretamente o espaçamento atômico interplanar, e a partir dessa quantidade, a própria tensão residual ou aplicada (ROSSINI et al., 2012).

Também oferece perspectivas interessantes pelo fato de gerar informações relevantes sobre o estado de deslocamento da rede e mudanças microestruturais. Considerando a profundidade de penetração dos raios X, ou seja, cerca de 5-10 μm da superfície, as medições são restritas a uma zona próxima à superfície do material, sendo a técnica apropriada se as mudanças microestruturais acontecerem nessa área. O uso de sistemas modernos portáteis estende a viabilidade da técnica,

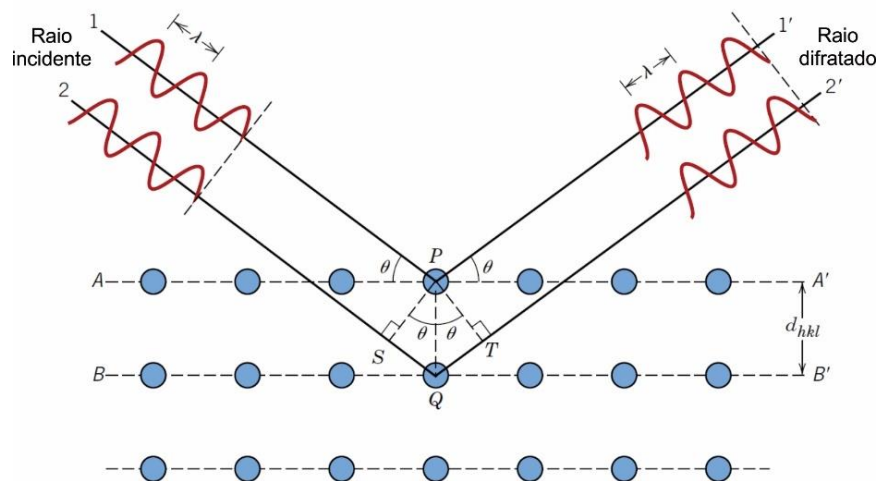
permitindo a avaliação direta da superfície das amostras em tempo real durante os testes (PINHEIRO et al., 2012).

É um método amplamente utilizado, pois possui velocidade de avaliação de rápida a média e sem contato com a peça. Além disso, é capaz de avaliar o estado de tensões uniaxial e biaxial. No entanto, a condição e preparação da superfície do material são importantes para medições adequadas (KANDIL et al., 2001).

A técnica de difração de raios X só pode ser aplicada a materiais cristalinos, policristalinos e semicristalinos, pois é baseada na determinação da deformação elástica que irá causar alterações no espaçamento entre os planos cristalográficos. Quando o material está sob tração, a distância entre planos aumenta, e quando o material está sob compressão, a distância diminui, sendo que a deformação pode ser calculada pela lei de Bragg (ROSSINI et al., 2012).

A difração ocorre quando uma onda encontra uma série de obstáculos regularmente espaçados, capazes de dispersar a onda, e com espaçamentos comparáveis em magnitude ao comprimento de onda (ver Figura 9). Além disso, é uma consequência de relações de fase específicas estabelecidas que foram dispersas pelos obstáculos (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

Figura 9 - Difração de raios X pelos planos de átomos.



Fonte: CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012

2.6 MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA A DUTOS FLEXÍVEIS

Visto que experimentos são normalmente caros e consomem tempo, uma grande quantidade de estudos analíticos e numéricos vem sendo realizados. No entanto, esses modelos ainda se baseiam em muitas hipóteses simplificadoras, especialmente em relação a pequenos deslocamentos e deformações, bem como efeitos de contato e atrito, fatores que limitam a aplicabilidade dos resultados (WANG; CHEN, 2011), tornando necessário o desenvolvimento complementar de alguns modelos experimentais.

A maioria dos modelos é construída de maneira a otimizar o tempo de processamento de dados. Shen *et al.* (2008) apresentaram um modelo simplificado que leva em consideração apenas um fio planificado, onde é assumido que o comportamento dos demais fios é semelhante. Um dos modelos considera a interação do fio com a resina dentro do conector, nas situações de aderência e não aderência total, sendo o segundo o pior caso, simulando os carregamentos operacionais. O outro modelo, de elementos finitos bidimensional, é usado para avaliar o efeito do processo de dobramento e desdobramento durante a montagem. As respostas combinadas dos modelos são utilizadas para avaliar a vida em fadiga do fio. Os cálculos realizados, levando em consideração o dobramento e a estrutura do conector, resultaram em danos por fadiga de cerca de 30% a 35% maiores do que no fio reto.

Lopes (2013) realizou ensaios com o dobramento dos fios da armadura de tração utilizando um dispositivo em bancada visando avaliar de forma experimental as deformações residuais provenientes do processo. Para esse experimento, os fios foram retificados e presos à bancada que é composta por um dispositivo capaz de ajustar o ângulo de dobramento e um gancho para contenção (ver Figura 10). Um modelo analítico simplificado foi implementado para estimar as tensões residuais a partir dos dados de deformação obtidos por *strain gages*, posicionados nas faces do fio no ponto de dobramento. As deformações foram elevadas, chegando a 7,5 vezes o escoamento no ponto mais crítico, e sofreram uma queda significativa ao se afastar. Vargas *et al.* (2014) utilizaram a mesma bancada para apresentar uma análise do nível de deformação comparando as técnicas de *strain gages* e fibra ótica. Foi verificada uma deformação de cerca de 7 vezes a de escoamento do material. Na comparação, as duas técnicas apresentaram resultados semelhantes, ainda que a utilização de *strain gages* tem um custo de cerca de 20 vezes menor.

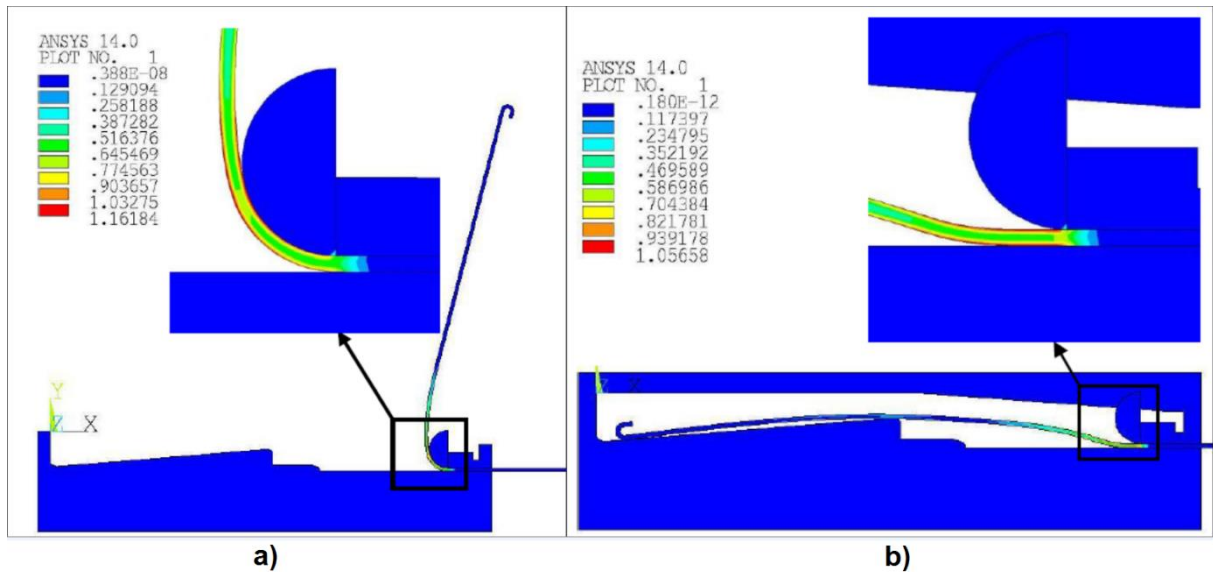
Figura 10 - Dispositivo de dobramento.



Fonte: LOPES, 2013

De Sousa *et al.* (2013) apresentaram um modelo de elementos finitos bidimensional da entrada do conector, onde foi estudada a tensão residual induzida nas armaduras de tração dentro do conector devido ao dobramento e desdobramento realizados durante a montagem. Este modelo também foi empregado para investigar os efeitos dos carregamentos de pré-teste e operacionais impostos aos fios. Três aspectos foram avaliados, isto é, condições de contato entre a resina e o fio, os níveis de tensões residuais induzidas durante os procedimentos de FAT e OLT, e variação das propriedades elásticas da resina. As razões de tensões, relação entre a tensão de Von Mises e a tensão de escoamento, obtidas para as etapas de montagem do conector estão apresentadas na Figura 11, onde a) apresenta a razão de tensões no ângulo de dobramento máximo do fio, e b) na configuração final do dobramento do fio no conector. Os estudos paramétricos indicaram que a entrada do conector é uma região de projeto crítica devido à excessiva deformação plástica imposta e a geometria final desfavorável do fio no conector.

Figura 11 - Razões de tensão no fio obtidas pelo autor. a) ângulo de dobramento máximo e b) configuração final depois da montagem do conector.



Fonte: adaptado de DE SOUSA et al., 2013

Campello (2014) desenvolveu um estudo abrangente composto de um modelo analítico e um modelo de elementos finitos bidimensional, criados para avaliar as tensões durante o processo de montagem do conector. O modelo analítico leva em consideração diversos efeitos que conduzem ao aumento da tensão nos fios devido ao processo de dobramento e desdobramento. O ponto de máxima curvatura durante o processo de dobramento foi utilizado como referência para o cálculo das tensões durante todas as etapas de montagem. No modelo numérico desenvolvido, a interação entre o fio da armadura de tração e a resina se dá através da contração da resina. As tensões relativas máximas encontradas, apresentadas como a razão da tensão no fio e a tensão de escoamento, chamada no trabalho de fator de utilização, ou seja, parametrizadas em função da tensão limite, resultaram entre 1,1 e 1,16 para o dobramento sobre o gabarito durante a montagem do conector. Para melhorar o desempenho do duto, o trabalho propõe um novo conceito de conector (*foldless*), onde essa etapa de dobramento não é necessária.

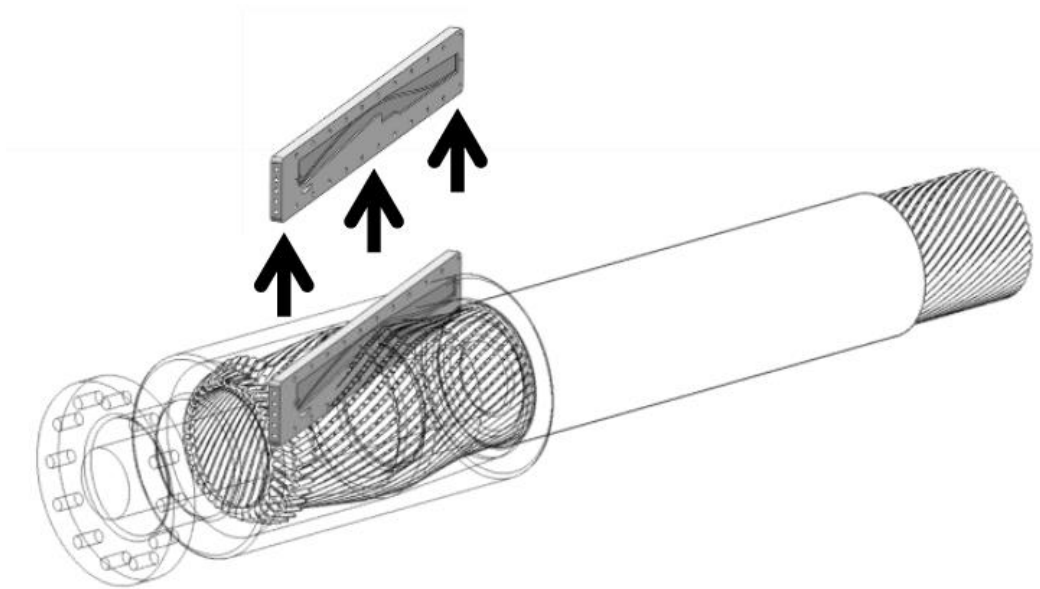
Benirschke (2014) correlacionou as tensões residuais com o raio do gabarito utilizado na montagem do conector. Foram realizadas avaliações com um modelo numérico bidimensional e um modelo analítico baseado na teoria de viga submetida à flexão. Foi verificado que a espessura do fio é o parâmetro de maior influência no comportamento deste, pois impacta no momento de inércia da seção transversal.

Consequentemente, possui impacto significativo na tensão residual, sendo que os perfis de menor espessura apresentam menores tensões residuais, mantendo uma relação diretamente proporcional. Já o raio do gabarito e, consequentemente, o raio desenvolvido pelo fio no dobramento, possuem uma relação inversamente proporcional com a tensão residual, isto é, quanto maior o gabarito, menor é a tensão residual.

Miyazaki (2015) apresentou um modelo de elementos finitos tridimensional do comportamento estrutural dos fios das armaduras de tração de dutos flexíveis dentro do conector. Nesse modelo, as tensões residuais e descontinuidades geométricas nos modelos foram avaliadas, levando em consideração os carregamentos de pré-teste e operacionais, comportamento não linear do fio, não linearidades geométricas e o processo de montagem. Observou-se um comportamento linear de aumento do raio residual, ou seja, o raio desenvolvido pelo fio após o dobramento quando não há mais força atuando sobre ele, e redução da tensão residual com o aumento do gabarito.

Borges *et al.* (2015) realizaram ensaios com uma caixa metálica que simula a seção bidimensional do conector real (ver Figura 12), com intuito de reduzir o número de variáveis e comparar diferentes configurações de montagem das armaduras de tração dentro do conector e seu comportamento à medida que é carregado estaticamente. A caixa compreende a estrutura externa do conector e a cavidade correspondente ao fio e a resina de ancoragem, reproduzindo inclusive o ângulo de assentamento dos fios. O experimento considera as regiões críticas de concentração de tensão, na extremidade do fio onde é feita a ancoragem, e da região de deformação plástica, onde os fios foram dobrados e desdobrados para realizar a vedação. As curvas de fadiga, ou curvas de tensão x número de ciclos (SN), obtidas pela metodologia da caixa bidimensional possuem inclinação semelhante às curvas de fadiga obtidas pelo método de flexão quatro pontos. No entanto, a vida em fadiga foi diminuída por um fator de 7, e todas as amostras falharam no ponto de dobramento, na entrada do conector, evidenciando a sua influência sobre o material.

Figura 12 – Conceito da caixa bidimensional correspondente a seção do conector.



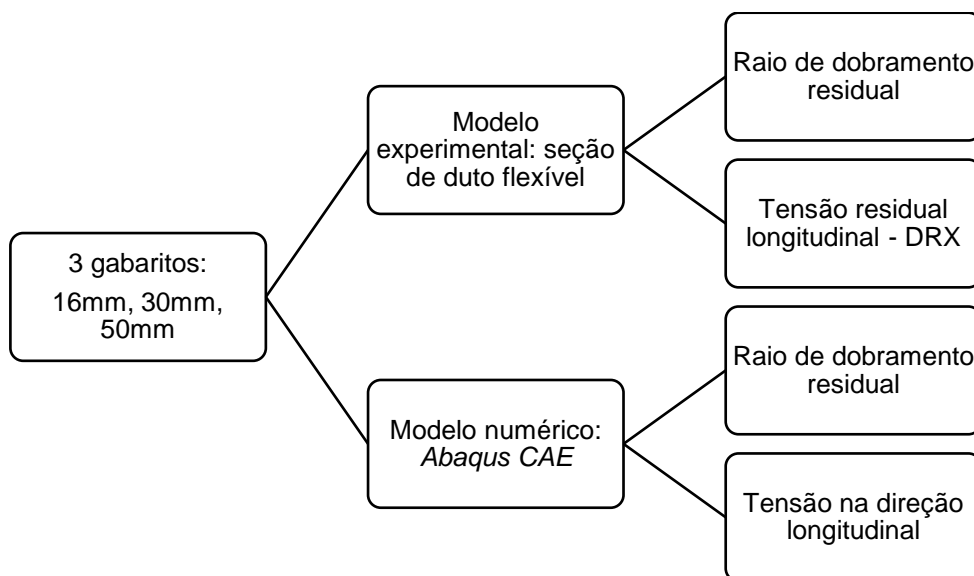
Fonte: BORGES *et al.*, 2015

De Sousa *et al.* (2017) apresentaram uma metodologia de análise de fadiga analítica dos fios da armadura de tração que leva em consideração diferentes raios de dobramento utilizados durante a montagem de conectores, além de outros parâmetros. Onde se pode inferir a vida em fadiga para os diferentes casos e o quanto a vida pode aumentar com o aumento do raio do gabarito, por exemplo, a mudança do raio de 30 mm para 50 mm aumenta a vida em fadiga de 40 anos para 200 anos.

3 METODOLOGIA

Dois modelos foram construídos para a avaliação e comparação, isto é, o modelo experimental, que consiste de um trecho de duto comercial, onde foi realizado o processo que simula a montagem do conector e um modelo numérico com dimensões e características semelhantes, onde o dobramento foi simulado, a Figura 13 apresenta em resumo as situações avaliadas no trabalho.

Figura 13 - Organograma do trabalho.



Fonte: A AUTORA, 2020

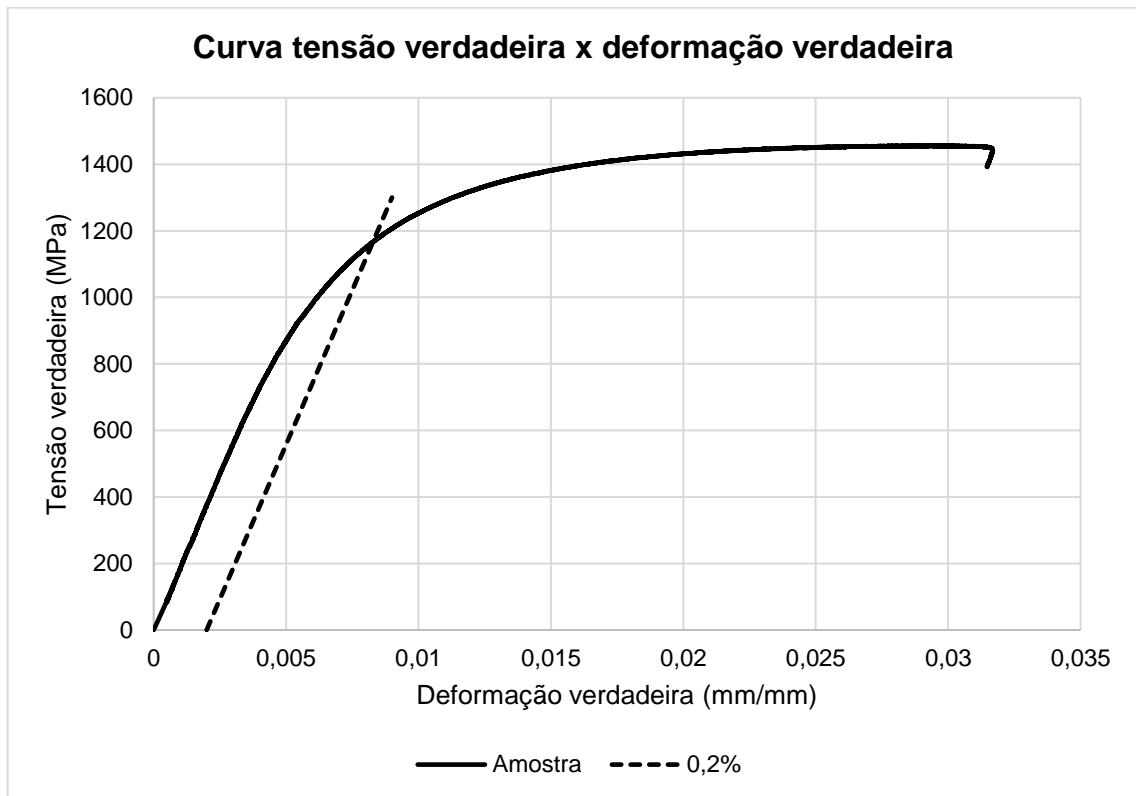
3.1 MODELO EXPERIMENTAL

O estudo experimental teve por premissa ser representativo em relação ao processo de montagem utilizado em campo e reproduzido no experimento em laboratório.

Para tanto, na realização do ensaio, foi selecionado um duto flexível com diâmetro interno de 6" e fios da armadura de tração com 3 mm de espessura, tamanho comumente utilizado em campo, tornando o estudo representativo e possibilitando a comparação com resultados de outros autores. Foram avaliados apenas os fios da armadura de tração externa, que apresentam condições de dobramento mais severas, e conseqüentemente devem levar a uma maior concentração de tensões residuais. Para caracterização do material da armadura de tração, e posterior uso no modelo numérico foi realizado ensaio de tração para obtenção da curva tensão x deformação,

que pode ser vista na Figura 14. O limite de escoamento do material é cerca de 1195 MPa, e seu limite de resistência de 1455 MPa.

Figura 14 - Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material do fio da armadura de tração.

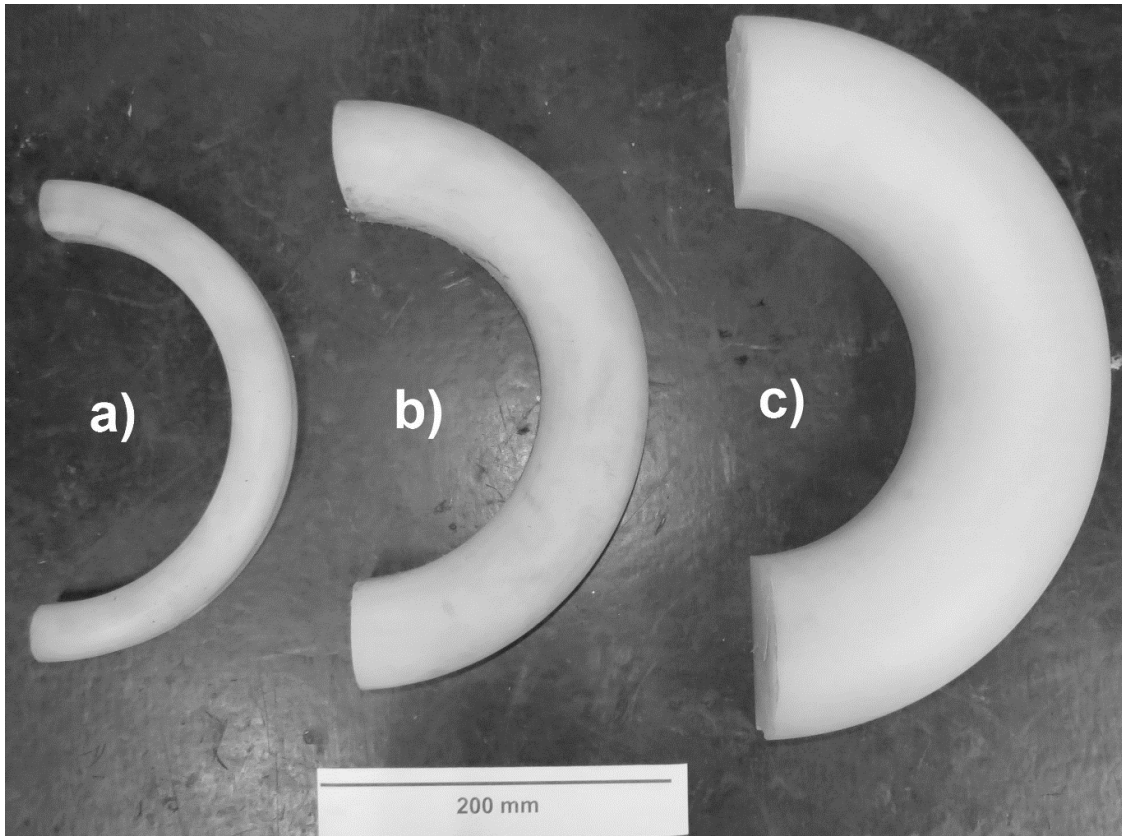


Fonte: A AUTORA, 2020.

3.1.1 Dispositivos de ensaio

Para a realização do ensaio, foram fabricados dispositivos de auxílio, como os gabaritos de controle de curvatura que simulam três diferentes raios de dobramento. Os raios de gabarito foram selecionados de acordo com experiências anteriores e são mostrados na Figura 15, sendo a) gabarito de 16mm, b) gabarito de 30mm e c) gabarito de 50mm.

Figura 15 - Gabaritos de controle de curvatura. a)16mm, b)30mm, c)50mm.



Fonte: A AUTORA, 2020

Conectores montados em campo dispõem de um miolo (*vault*) sobre o qual os fios das armaduras de tração são dispostos para a resinagem e fechamento do conjunto. Para representar essa peça, foi fabricado um dispositivo representado o miolo do conector sobre o qual os fios foram dobrados e presos na etapa final do ensaio.

3.1.2 Etapas do ensaio

O método empregado no ensaio se divide em quatro etapas principais. A etapa 1 consiste no dobramento dos fios das armaduras de tração no sentido contrário ao assentamento original dos fios, até a posição que permita a instalação da extremidade livre do fio no dispositivo de contenção. A etapa 2 consiste na liberação dos fios do dispositivo de contenção, sem realização de conformação adicional, deixando-os na posição livre. Neste ponto de retorno elástico, chamado comumente de *springback*, foram removidos alguns fios para a medição de tensões residuais.

A etapa 3, consiste na instalação dos fios na posição final de montagem do conector, onde estes são dobrados novamente na configuração mais próxima possível ao enrolamento original, porém sobre o miolo do conector de campo. Para o ensaio, foi fabricado o dispositivo para simular esse componente. Após a montagem, foi realizada a etapa 4, que consistiu na liberação dos fios da posição sobre o miolo do conector. Apesar desta etapa não ocorrer em campo, é interessante se conhecer as tensões residuais neste ponto (amostras foram removidas para a medição de tensões residuais através da técnica de DRX).

3.1.3 Realização do ensaio

O trecho de duto foi seccionado em amostras com cerca de 1.200mm. Para a realização dos ensaios, as amostras foram colocadas sobre roletes, para manter o giro livre e garantir acesso a toda a circunferência do duto.

Para a identificação e rastreabilidade dos fios retirados das amostras, cada corpo de prova (CP) recebeu uma designação própria composta de 4 caracteres que indicam o raio do gabarito utilizado, a armadura de tração do duto, a etapa em que foi retirado, e uma letra diferencial entre corpos de prova da mesma etapa, como mostra a Tabela 1. Por exemplo, o CP 2E3B corresponde à uma seção de fio onde foi utilizado o gabarito de 30mm, da armadura externa, obtido na etapa 4 de dobramento, e possui a letra B para diferenciação dos demais CPs que possuem as mesmas condições anteriores.

Tabela 1 - Identificação dos corpos de prova.

Gabarito	1 = 16 mm 2 = 30 mm 3 = 50 mm
Armadura	E = Externa
Etapa	1 = Sem dobramento 2 = Etapa 2 3 = Etapa 4
Corpo de prova	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J

Fonte: A AUTORA, 2020

Foram utilizados 3 trechos diferentes de duto, um para cada tamanho de gabarito citado, sendo detalhado aqui uma sequência, que foi repetida para todas as

amostras. Com a amostra posicionada na bancada de ensaio, a primeira atividade foi a abertura de uma janela para acesso às armaduras de tração. Os fios da armadura externa tiveram um dos lados cortados e protegidos para começar o dobramento e evitar acidentes, sendo que não passaram por um processo de limpeza para que não fosse alterado o estado original dos fios. Primeiramente, foram removidos alguns fios da armadura de tração para a medição da tensão residual inicial. Em seguida, o gabarito de dobramento foi assentado sobre os fios da armadura externa, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Posicionamento do gabarito de controle de curvatura.



Fonte: A AUTORA, 2020

A Etapa 1 do ensaio consistiu no dobramento de todos os fios restantes da armadura de tração externa no sentido contrário ao enrolamento original, sendo dobrados sobre o gabarito de controle de curvatura, conforme mostra a Figura 17, e presos no dispositivo de contenção, que é formado por ganchos para encaixe dos fios.

Figura 17 - Primeira etapa de dobramento sobre o gabarito de controle de curvatura.



Fonte: A AUTORA, 2020

Na Etapa 2, os fios foram desprendidos do dispositivo de contenção para observar o efeito do retorno elástico. Nessa etapa, foi realizada a medição dos raios residuais, sendo oito fios selecionados para cada gabarito utilizado. Estes fios foram cortados do duto tomando-se o cuidado de manter pelo menos 50 mm do ponto de maior deformação até o corte, e levados para a medição de tensões residuais através da técnica de DRX.

O dispositivo que simula o miolo do conector foi então posicionado próximo ao ponto de dobramento das armaduras de tração e fixado com fita metálica, sendo que nos três casos de gabarito ensaiados foi utilizado o mesmo dispositivo. Na Etapa 3, os fios desprendidos do dispositivo de contenção na etapa anterior foram dobrados sobre o miolo, mantendo o ângulo de assentamento o mais próximo possível ao enrolamento original do duto, como visto na Figura 18, sendo estes então presos com cinta plástica para permanecerem na posição indicada.

Figura 18 – Terceira etapa do dobramento sobre o miolo do conector.

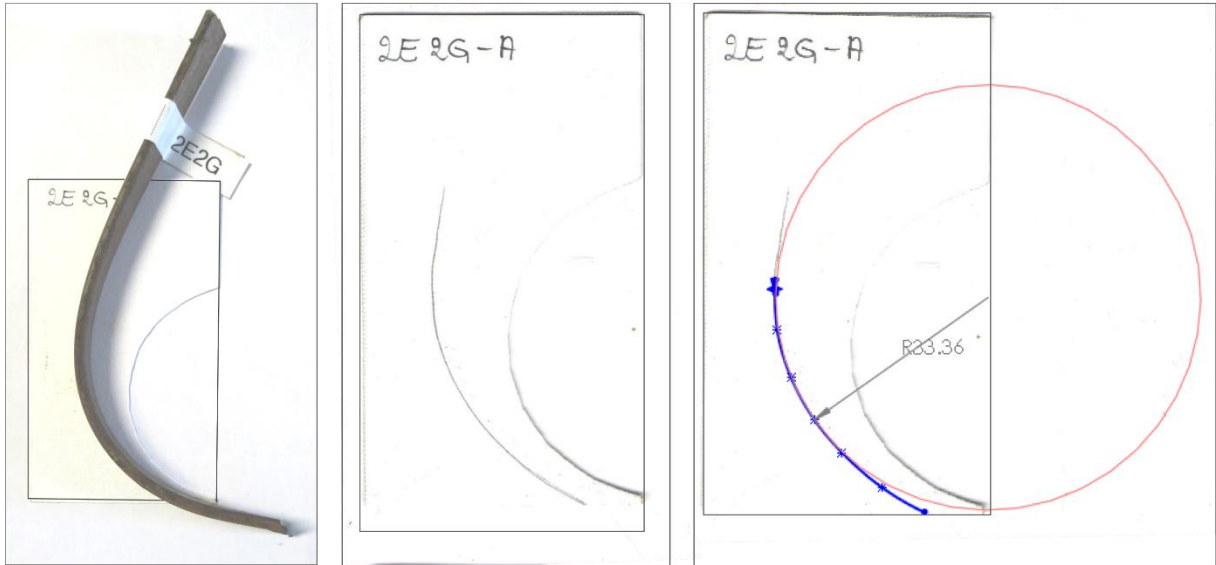


Fonte: A AUTORA, 2020

Na Etapa 4, os fios foram desprendidos do miolo do conector sem conformação adicional. Estes fios foram cortados do duto para a posterior medição da tensão residual com DRX, mantendo-se a distância de pelo menos 50mm da seção de maior deformação até o corte. Os raios residuais foram medidos nesta etapa de retorno elástico para oito fios.

Para a determinação do raio residual dos fios, optou-se pela utilização de uma metodologia simplificada, constituída pelo posicionamento de um papel de gramatura 180 g/m², tamanho cartão de visita, ao lado da face do fio, onde a linha correspondente à curva do fio foi delineada. Posteriormente, os papéis foram digitalizados e importados para um *software* de projeto, onde a linha foi analisada (ver Figura 19).

Figura 19 – Processo de análise do raio residual nos fios da armadura de tração.



Fonte: A AUTORA, 2020

3.1.4 Medição de tensões residuais

A medição das tensões residuais foi realizada através da técnica de DRX, executada no equipamento da marca GE, modelo *Seifert Charon XRD M Research Edition*, existente no LAMEF/UFRGS (ver Figura 20).

Figura 20 - Difratorômetro de raios X.



Fonte: LAMEF, 2018

O equipamento utiliza a técnica de difração de raios X e o cálculo de tensões é realizado através do método $\sin^2 \psi$. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados pelo equipamento, sendo o tempo de ensaio para uma medição em uma direção de aproximadamente 15 minutos.

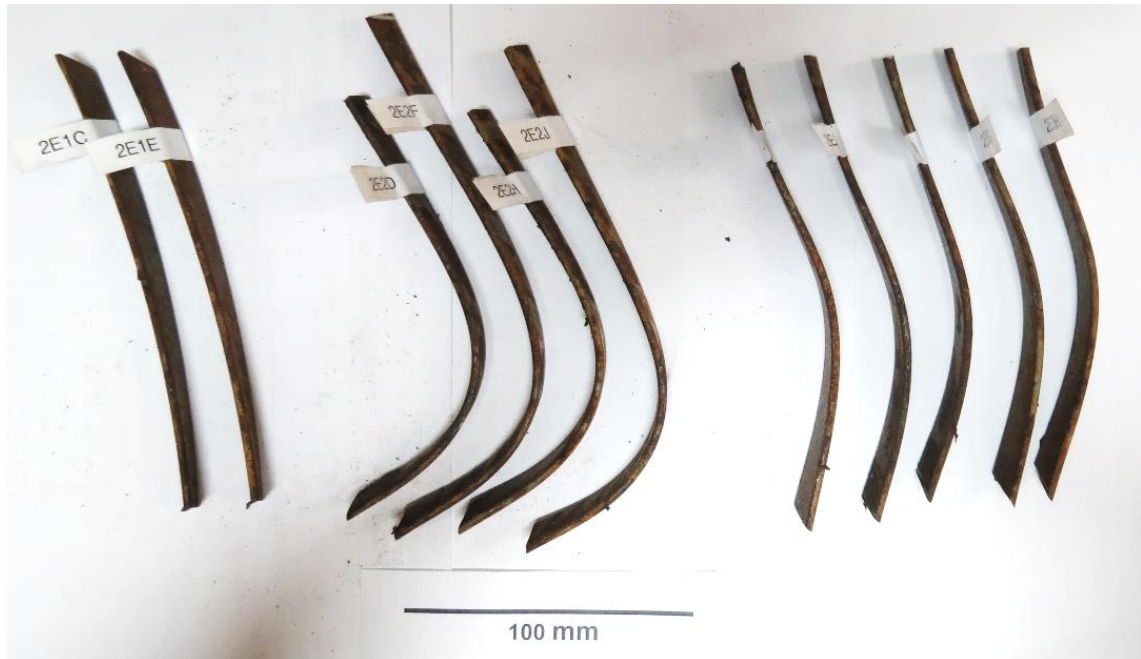
Tabela 2 - Parâmetros de medição.

PARÂMETROS DE MEDIÇÃO	
Elemento do tubo de raios X	Cr
Comprimento de onda k- α	2,2897 Å
Tensão do tubo	30 KV
Corrente	50 mA
Detector usado	Meteor 1D
Ângulos utilizados no sentido tangencial	[-60° até +60°], Chi (ψ) = 13
Passo	0,05°
Pico de difração utilizado	{2 1 1} {h k l} 2-Ângulo teta [156,08°]
Varição do ângulo de difração	[147° - 166°]
Colimador	2 mm

Fonte: A AUTORA, 2020

Os corpos de prova foram seccionados com cerca de 150 mm de comprimento para adequação ao tamanho de utilização no equipamento de DRX, tomando-se o cuidado de manter a distância de pelo menos 50 mm do ponto onde seria realizada a medição. A Figura 21 exemplifica os corpos de prova cortados e identificados para a medição do gabarito de 30mm, separados por etapas. Na etapa sem dobramento, foram utilizados dois corpos de prova, enquanto para a etapa 2 foram quatro corpos de prova e, finalmente para a etapa 4, foram selecionados cinco corpos de prova. Os mesmos cuidados e quantidade de amostras foram utilizados para cada um dos três gabaritos avaliados pelo trabalho.

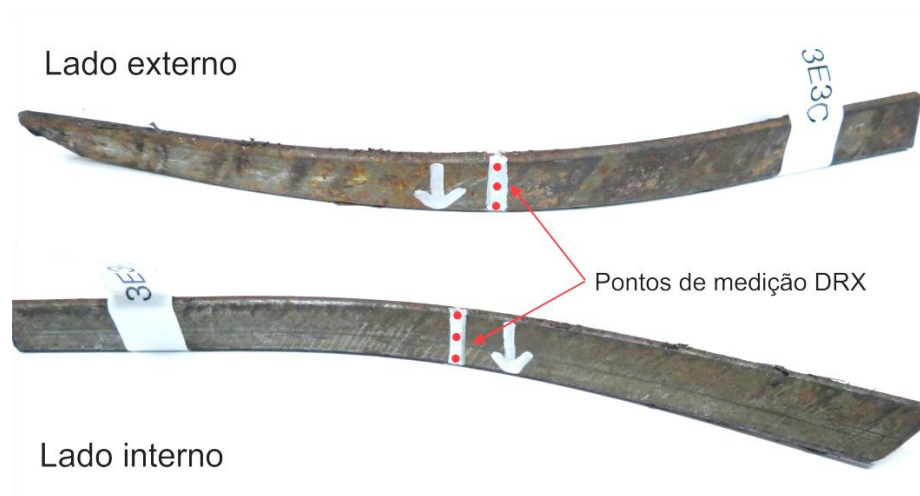
Figura 21 – Corpos de prova para medição de tensões residuais.



Fonte: A AUTORA, 2020

As medições das tensões residuais longitudinais por DRX foram realizadas em três pontos superficiais do lado interno e mais três pontos no lado externo dos fios, exatamente na região do dobramento, visualmente mais deformada, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 - Pontos de medição do DRX.



Fonte: A AUTORA, 2020

3.2 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico tridimensional foi desenvolvido para simular os parâmetros do processo de dobramento durante a montagem do conector. Para a obtenção de dados de comparação, foram utilizados os mesmos raios de gabarito de controle de curvatura empregados no modelo experimental, assim como parâmetros de espessura do fio e dimensão do conector.

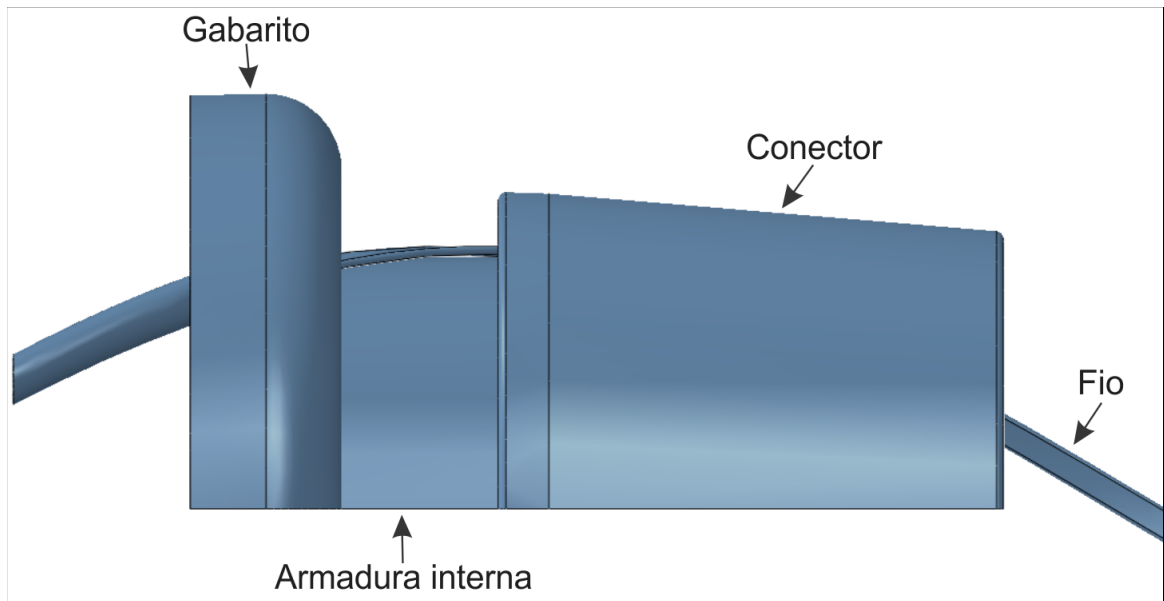
Os modelos sólidos foram desenvolvidos no *software SolidWorks*, mais robusto para a modelagem necessária. O modelo de análise de elementos finitos foi desenvolvido no *software Abaqus CAE*.

3.2.1 Geometria

Com a finalidade de simplificar o modelo e otimizar os recursos computacionais, foram empregadas algumas estratégias durante a sua construção. Devido à similaridade entre o comportamento dos fios e levando-se em consideração que, neste caso, um fio não provoca interferência nos demais, somente um fio é utilizado na análise e modelagem numérica. Foi considerada apenas a armadura de tração externa, que sofre com maiores deformações durante o processo de montagem e desconsideradas as tensões residuais de fabricação do duto flexível.

Apenas a parte interna do conector foi considerada, porque é sobre ela que os fios são dobrados na última etapa da montagem. Como não foram estudados os efeitos da interação do fio com a resina, nem carregamentos posteriores, a parte externa e fechamento do conector foram desconsiderados. Um componente foi adicionado para simular o efeito da armadura interna e impedir que os fios se deformassem além do que ocorre no processo de montagem. A Figura 23 apresenta os componentes do modelo numérico construído.

Figura 23 – Montagem do modelo numérico tridimensional.

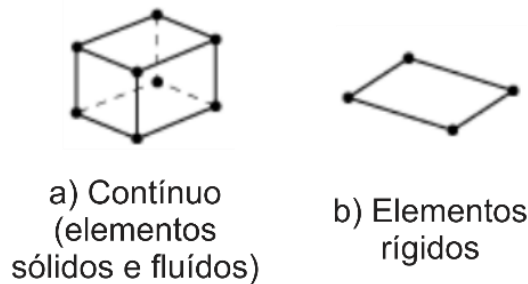


Fonte: A AUTORA, 2020

Para essa análise, o único componente considerado deformável foi o fio. Os demais componentes foram considerados corpos rígidos, sem deformação e sem deslocamento, atuando como limites para o dobramento do fio. Os corpos rígidos são usados para modelar restrições entre os componentes deformáveis, sendo que fornecem um método eficiente de especificar certas interações de contato.

Cinco aspectos do elemento caracterizam seu comportamento: família, graus de liberdade, número de nós, formulação e integração. A primeira letra do nome dos elementos indica a família, sendo que C indica elementos contínuos e R elementos rígidos, por exemplo, que podem ser vistos na Figura 24. Os graus de liberdade são as variáveis fundamentais calculadas durante a análise. Deslocamentos ou outros graus de liberdade são calculados nos nós do elemento, já em outros pontos do elemento, os deslocamentos são obtidos pela interpolação do deslocamento nodal (DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA, 2012).

Figura 24 – Elementos utilizados. a) contínuo b) rígido



Fonte: adaptado de DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA, 2012

Para a análise em questão, que envolve grandes deformações, sugere-se a utilização de uma malha refinada com elementos lineares e integração reduzida. Da mesma forma, é interessante o emprego de elementos hexaédricos para modelos tridimensionais sempre que possível, pois geram os melhores resultados com menores custos de processamento (DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA, 2012).

3.2.2 Modelo

O modelo numérico elaborado abrange submontagens específicas para os diferentes raios de gabarito de controle de curvatura empregados. Contudo, a distância entre o gabarito e o conector permaneceu a mesma nos três casos.

Os elementos rígidos do modelo foram posicionados e fixados através de uma restrição do tipo encastre, de modo que não tenham nenhum deslocamento no modelo, agindo somente como barreira para o componente deformável.

O fio, único elemento deformável do modelo, teve sua ponta fixada a partir da interação com outra parte, que age como a restrição imposta pelo espaço entre a armadura de tração interna e a camada polimérica externa. Essa interação permite que uma das extremidades do fio fique presa, enquanto o resto pode se deformar livremente. Os dados de deformação plástica do material obtidos com o ensaio de tração foram inseridos no *software* de simulação numérica.

A interação entre o fio e os demais elementos da montagem é caracterizada a partir de uma condição de contato normal em que os corpos não podem transpor uns aos outros. O comportamento tangencial possui um atrito associado, sendo que para contatos entre aço e polímero e entre elementos de aço foi considerado um coeficiente

de atrito de 0,3 e 0,8, respectivamente (BARRETT, 1990; MIYAZAKI, 2015). Ainda, com o intuito de se aproximar do experimento, os carregamentos foram aplicados em forma de deslocamento, em uma seção do fio analisado.

Na construção da malha de elementos finitos, a geometria deformável foi constituída por elementos do tipo C3D8R, um hexaedro linear de 8 nós, com integração reduzida, da família de elementos de tensão 3D. As geometrias rígidas foram desenvolvidas com elementos R3D4, quadriláteros rígidos bilineares 3D de 4 nós, da família dos elementos rígidos discretos. A Tabela 3 apresenta os elementos e número de nós presentes nos modelos desenvolvidos, as colunas representam os raios de gabaritos utilizados, e as linhas apresentam o número de elementos e nós em cada modelo.

Tabela 3 - Características da malha.

	16 mm	30 mm	50 mm
Elementos C3D8R	144192	145344	173360
Elementos R3D4	101584	110578	127562
Número de nós	270038	280376	327185

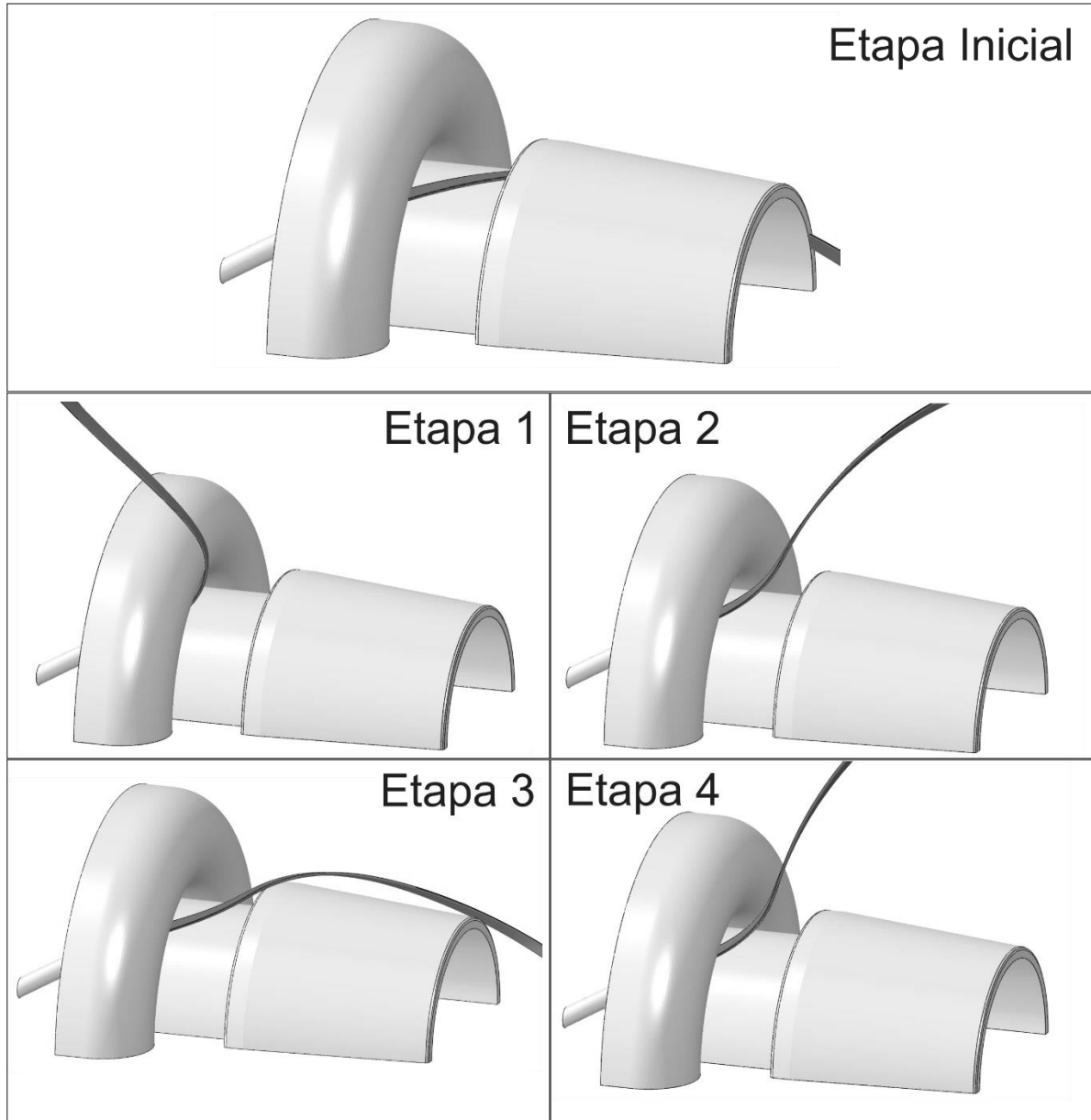
Fonte: A AUTORA, 2020

Assim como no modelo experimental, o dobramento foi realizado em 4 etapas, sendo estas apresentadas na Figura 25. Na primeira etapa, simula-se o dobramento sobre o gabarito de controle de curvatura. Já a segunda etapa corresponde ao retorno elástico, onde nenhuma força atua sobre o fio. A terceira etapa representa o dobramento sobre o conector, até o fio atingir o dispositivo. Finalmente, a quarta etapa se refere ao segundo retorno elástico, onde novamente nenhuma força atua no fio. Essa última condição ocorreria se o fio fosse solto do conector e corresponde à tensão residual final que será medida pela técnica de DRX.

Nesse modelo, as tensões residuais foram obtidas a partir da média de cinco pontos avaliados na superfície do fio, na seção de maior curvatura, em posições próximas às empregadas nas medições através de DRX no modelo experimental. Os valores foram obtidos na direção das tensões principais seguindo o eixo longitudinal do fio.

Para a medição do raio residual no modelo numérico, a malha deformada foi exportada para um *software* de CAD, sendo que apenas a geometria deformada do modelo final de cada gabarito de controle foi avaliada.

Figura 25 - Representação das etapas analisadas no modelo numérico.



Fonte: A AUTORA, 2020

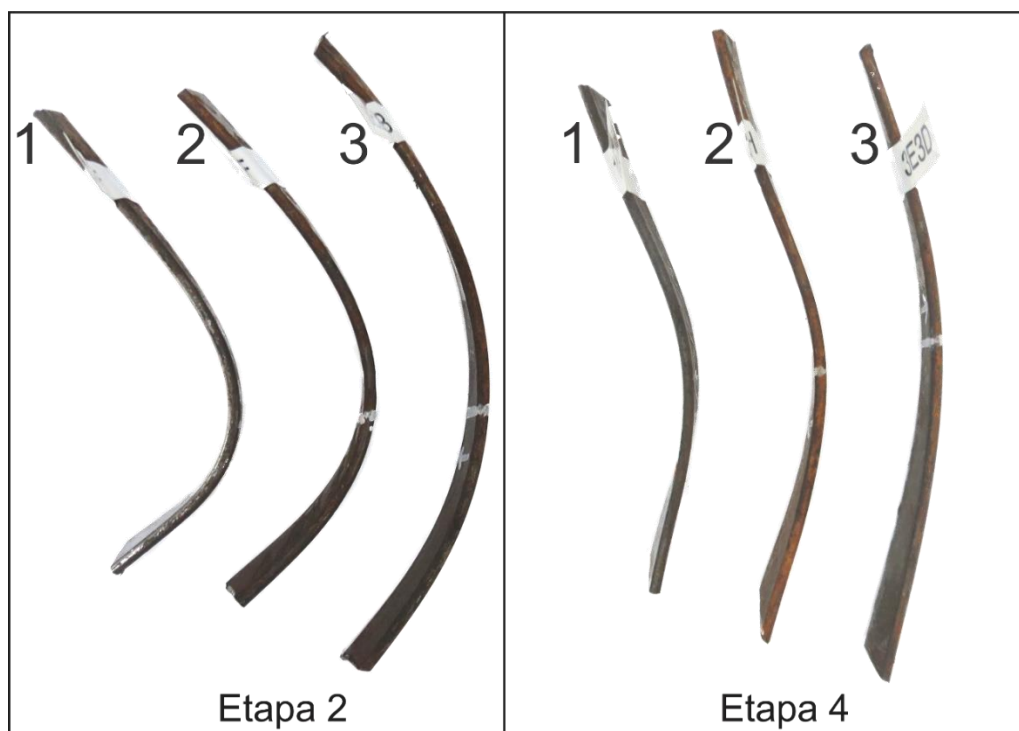
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dois modelos foram desenvolvidos, e obtiveram comportamento satisfatório, seus resultados são apresentados na sequência.

4.1 MODELO EXPERIMENTAL

No modelo experimental, foi realizada a medição do raio residual e das tensões residuais nas duas etapas de retorno elástico dos fios, isto é, após o dobramento sobre o gabarito de controle de curvatura e após o dobramento sobre o conector (etapas 2 e 4, respectivamente). A Figura 26 apresenta os fios deformados nas etapas 2 e 4, com o emprego dos três gabaritos considerados nesta investigação (ver Tabela 1), onde o número 1 representa o gabarito de 16mm, 2 o gabarito de 30mm e 3 o gabarito de 50mm.

Figura 26 – Comparação dos fios deformados nas etapas 2 e 4 para os diferentes gabaritos utilizados no modelo experimental, onde 1 – gabarito de 16mm, 2 – gabarito de 30mm e 3 – gabarito de 50mm.

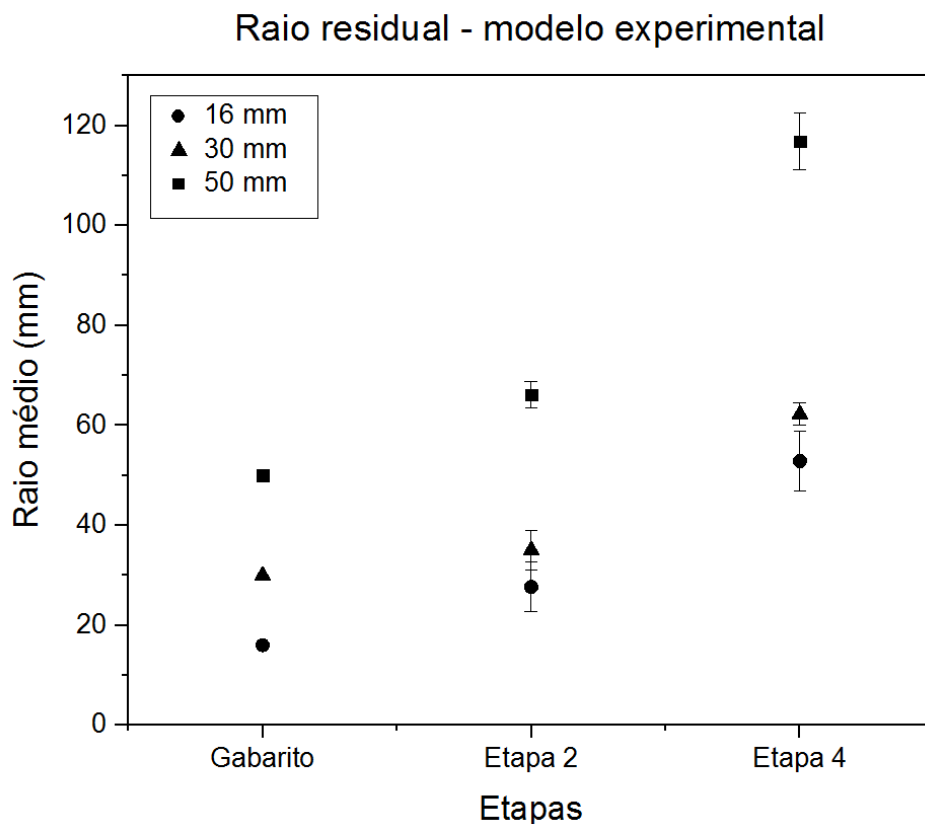


Fonte: A AUTORA, 2020

4.1.1 Raio residual

Seguindo o modelo proposto, foram avaliados os raios de dobramento residuais das amostras dos três diferentes gabaritos investigados para as duas etapas de retorno elástico, isto é, etapas 2 e 4. A Figura 27 apresenta a média dos resultados obtidos nas medições, juntamente com o desvio padrão demonstrado pela barra vertical.

Figura 27 - Raios de dobramento médios obtidos no modelo experimental para os três gabaritos avaliados nesta investigação e as duas etapas de dobramento, a barra vertical indica desvio padrão.



Fonte: A AUTORA, 2020

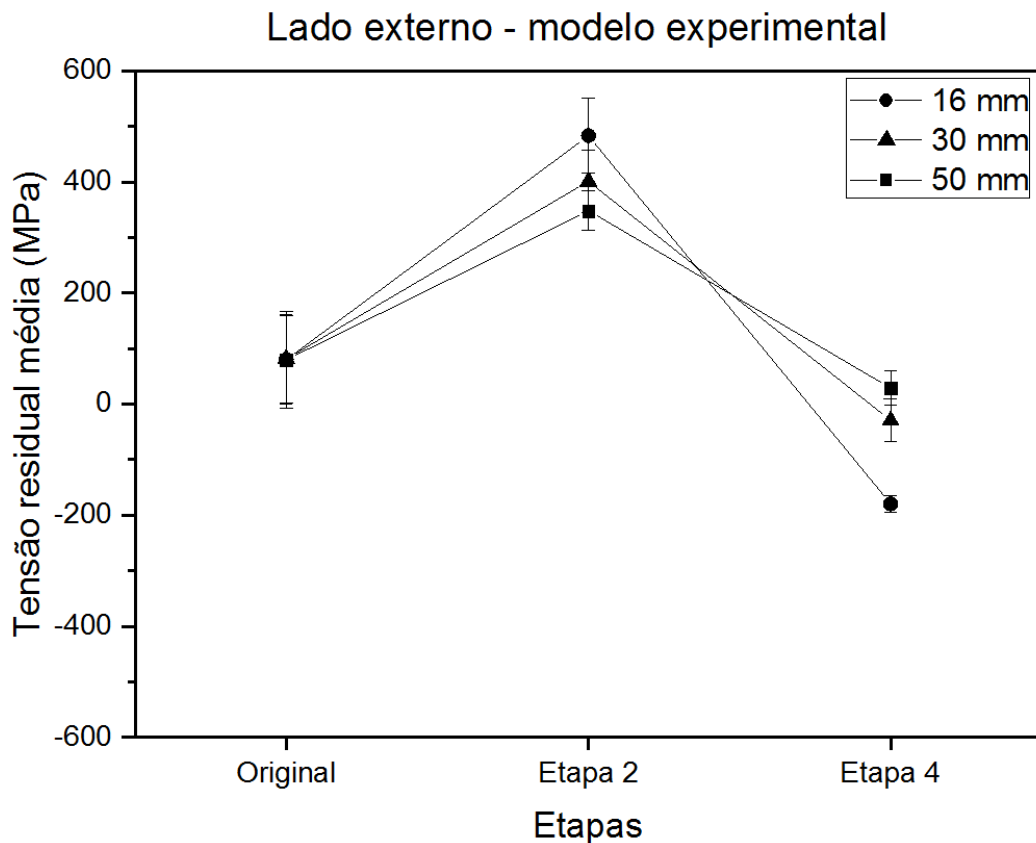
O modelo experimental mostrou um aumento no raio residual conforme aumento do gabarito de controle de curvatura utilizado, sendo que este resultado segue o comportamento esperado. Pode-se destacar que com a utilização do gabarito de 50 mm, os raios residuais obtidos são consideravelmente maiores do que nos demais. Foi possível identificar que a curvatura do fio é visualmente suavizada com o aumento do raio do gabarito, principalmente ao se comparar os gabaritos de 30mm e 50mm em relação ao gabarito de 16mm. Nas etapas 2 e 4 a diferença entre raios

residuais dos gabaritos de 16mm e 30mm permanece semelhante, da ordem de 9mm, enquanto ao compararmos os gabaritos de 30mm e 50mm, a diferença entre raios que inicialmente era de 20mm chega até a 55mm no raio residual da etapa 4.

4.1.2 Tensões residuais

As tensões residuais passaram por grandes variações ao longo do processo de dobramento, devido às deformações impostas. A Figura 28 apresenta os resultados das medições das tensões residuais na direção longitudinal do fio pelo método de DRX para o lado externo do fio, juntamente com o desvio padrão demonstrado pela barra vertical.

Figura 28 - Tensões residuais médias medidas na direção longitudinal no lado externo do fio para os três raios de gabaritos e duas etapas de retorno elástico, a barra vertical indica desvio padrão.



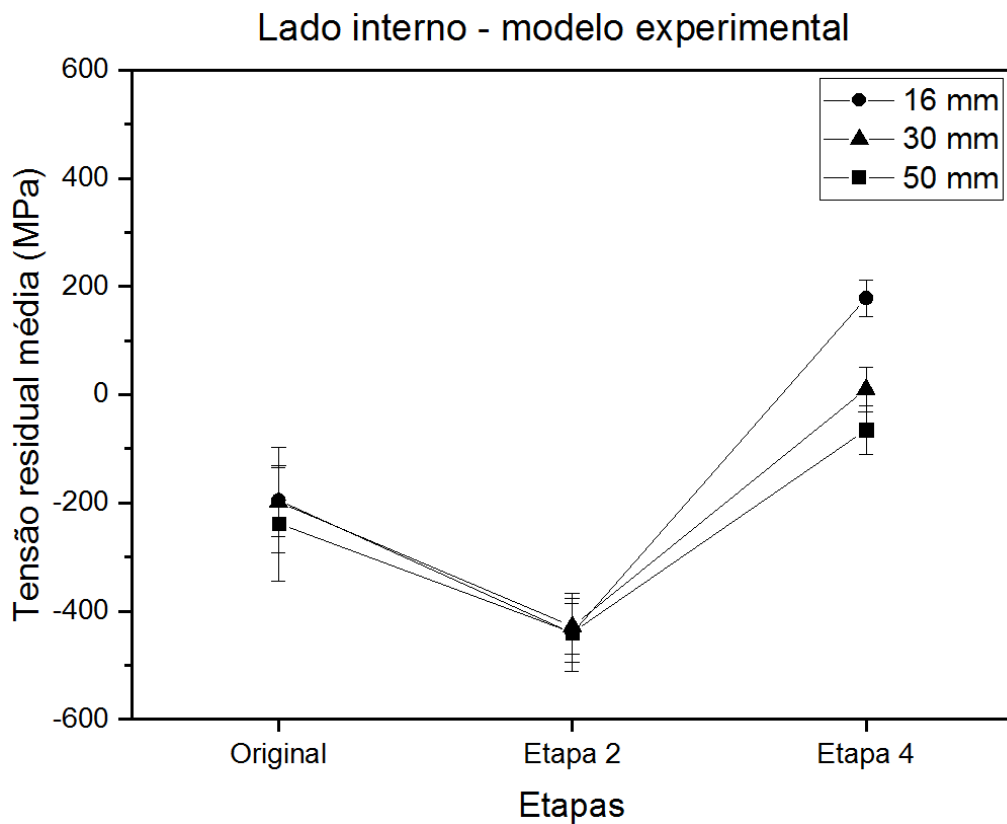
Fonte: A AUTORA, 2020

Os resultados apresentados foram obtidos através do cálculo da média dos resultados dos pontos e das amostras avaliadas para os três diferentes gabaritos utilizados. As medições indicaram que no lado externo do fio, a tensão residual

verificada era inicialmente trativa, cerca de 80 MPa. Com a primeira etapa do dobramento que ocorre sobre o gabarito, a tensão residual trativa aumenta drasticamente na etapa 2, principalmente para o menor gabarito, onde a tensão verificada é de 480 MPa. Com a última etapa de dobramento sobre o miolo do conector, o fio sofre uma mudança no estado de tensões residuais, passando a ser desde compressiva de -180 MPa para o menor gabarito, até trativa de 30 MPa para o gabarito de 50 mm de raio. Apesar de na medição de raio residual o maior destaque estar no grande aumento de raio residual com o uso do gabarito de 50mm, ao medir-se a tensão residual, este efeito não é tão evidente, sendo mais acentuado o efeito do gabarito menor na diferença entre tensões residuais, sobretudo na etapa 4.

A Figura 29, apresenta a variação das tensões residuais no sentido longitudinal no lado interno do fio da armadura de tração, juntamente com o desvio padrão demonstrado pela barra vertical.

Figura 29 – Tensões residuais longitudinais médias medidas no lado interno do fio para os três raios de gabaritos e duas etapas de retorno elástico, a barra vertical indica desvio padrão.



Fonte: A AUTORA, 2020

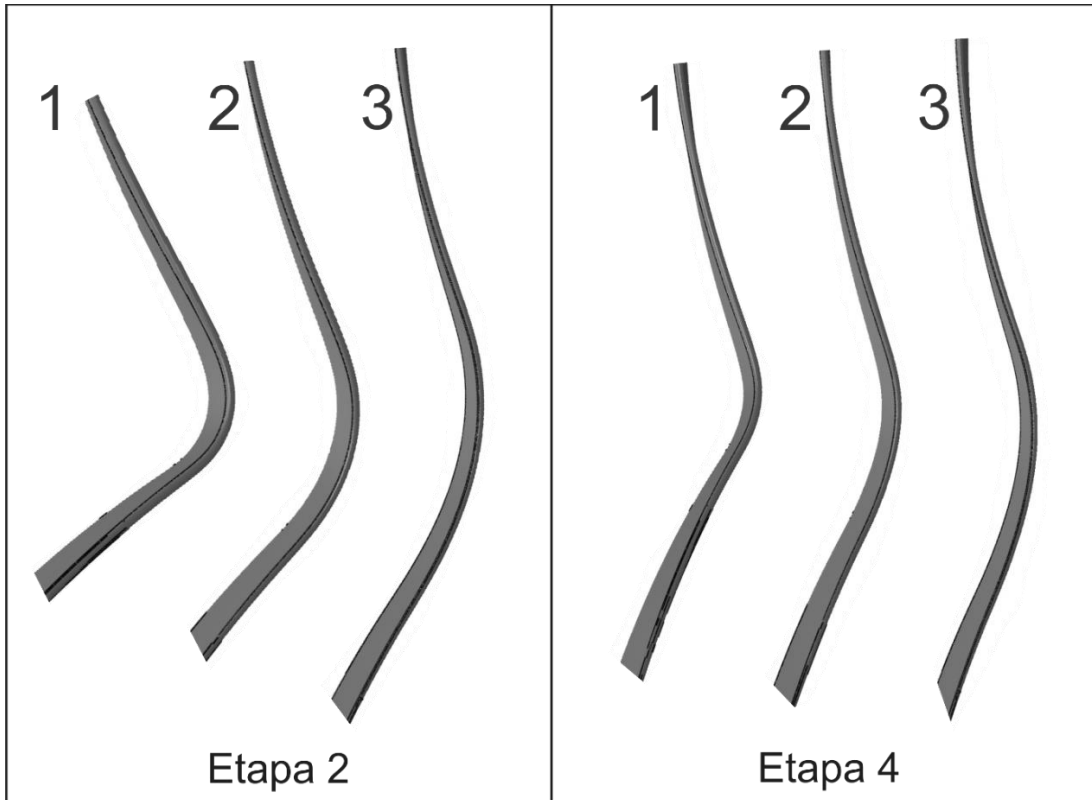
O lado interno do fio em seu estado original, como retirado do duto, apresentou uma tensão residual compressiva de cerca de -200 MPa. Ao ser dobrado sobre o gabarito (etapa 2), esta tensão residual compressiva se intensificou, chegando a um valor médio de aproximadamente -440 MPa para todas as amostras. Na etapa 4, ao ser dobrado sobre o miolo do conector, no entanto, houve uma grande variação na tensão residual entre os três gabaritos considerados, variando desde 180 MPa para o gabarito de 16 mm até cerca de -60 MPa para o gabarito de 50 mm.

A partir dos resultados da etapa 2 na face interna do fio, observou-se que as tensões residuais médias são muito próximas para as três condições de dobramento (raios), o que indica uma deformação uniforme sofrida pelos fios na parte de fora de sua curvatura, independentemente do tamanho do gabarito utilizado. Por outro lado, a face externa mostrou uma maior variação, especialmente para o menor raio de dobramento, que não é bem contornado pelo fio durante o dobramento. Na etapa 4, o efeito da diferença no raio se torna mais evidente, com o retorno dos fios para a posição próxima à original de enrolamento no corpo tubular. Os resultados obtidos no modelo experimental podem sofrer influência de diversos fatores, por serem realizados manualmente.

4.2 MODELO NUMÉRICO

No modelo numérico de elementos finitos tridimensional, também foram avaliados os raios e tensões residuais nas duas etapas de retorno elástico, para os três diferentes raios de gabarito. A Figura 30 apresenta os fios deformados nas etapas 2 e 4 no modelo numérico com o emprego dos três gabaritos considerados, onde o fio de número 1 representa o gabarito de 16mm, 2 o gabarito de 30mm e 3 o gabarito de 50mm.

Figura 30 – Comparação dos fios deformados nas etapas 2 e 4 para os diferentes gabaritos utilizados no modelo numérico, onde 1 – gabarito de 16mm, 2 – gabarito de 30mm e 3 – gabarito de 50mm.

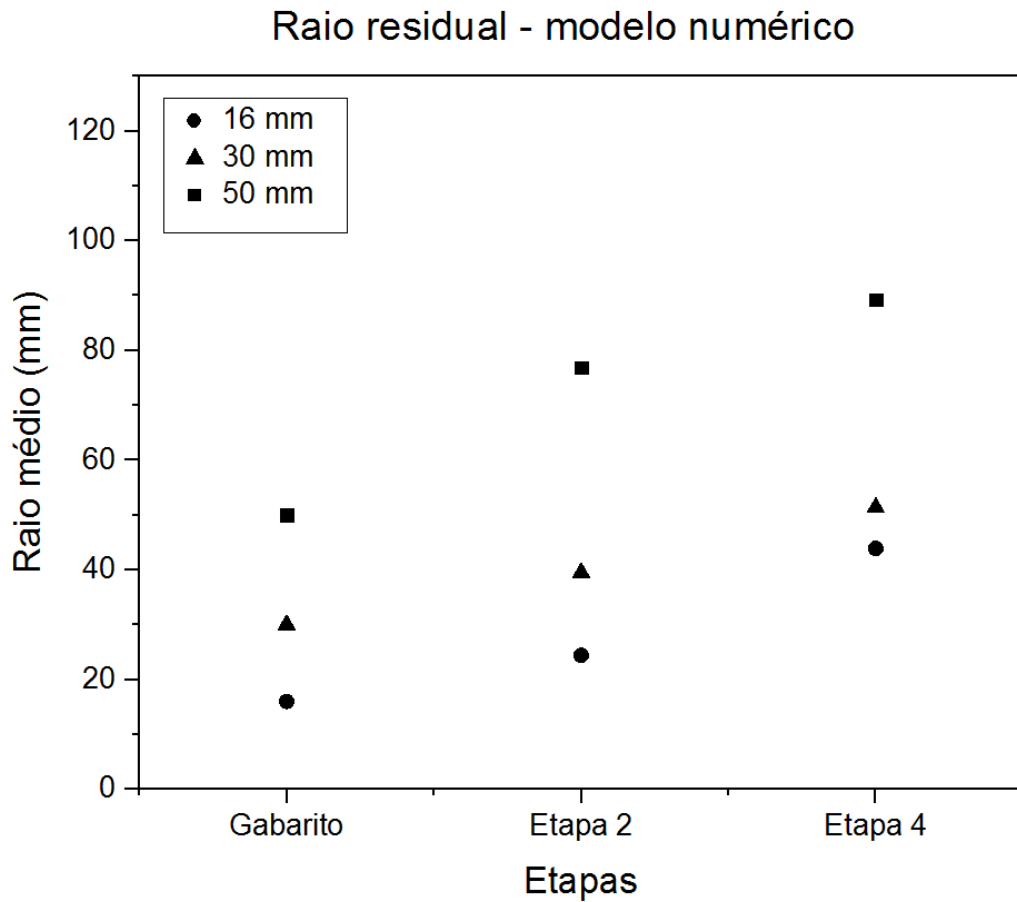


Fonte: A AUTORA, 2020

4.2.1 Raio residual

A Figura 31 apresenta os raios residuais obtidos por meio de simulação numérica. Verificou-se o aumento do raio residual desenvolvido pelo fio conforme o gabarito de controle de curvatura foi ampliado. De uma forma geral, os raios residuais obtidos através do modelo numérico foram próximos aos do modelo experimental, principalmente na etapa 2. Na etapa 4, foi verificada uma diferença entre os gabaritos um pouco maior, de cerca de 10mm. Entretanto, ainda assim, esses valores corroboram com os resultados obtidos nos trabalhos de Benirschke (2014) e Campello (2014).

Figura 31 - Raios de dobramento obtidos no modelo numérico em função dos diferentes raios dos gabaritos e etapa de deformação dos fios.



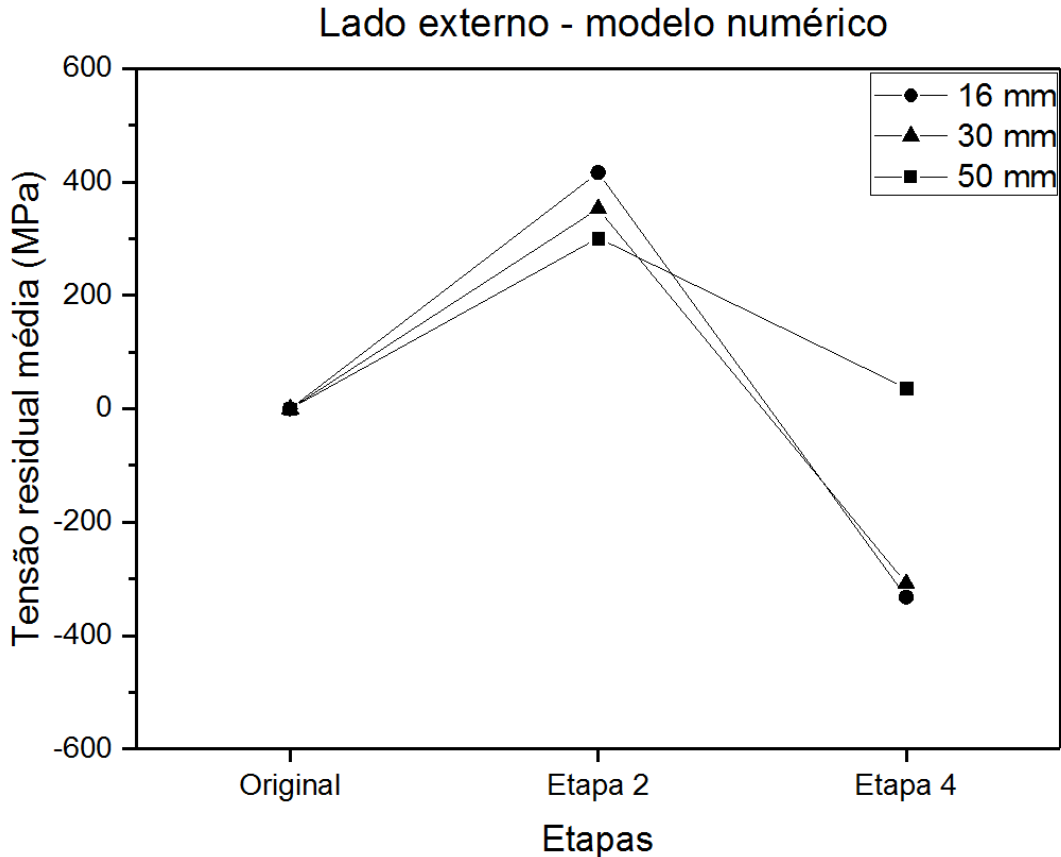
Fonte: A AUTORA, 2020

4.2.2 Tensões residuais

Os principais pontos de interesse se referem à superfície do fio, pois como visto na literatura (DE SOUSA *et al.*, 2013; MIYAZAKI, 2015), e durante a realização do presente modelo numérico, é onde as maiores tensões residuais se desenvolvem. Além disso, a superfície do fio é o local onde ocorre a medição por DRX.

A Figura 32 mostra o comportamento das tensões no lado externo do fio no modelo numérico.

Figura 32 – Tensões residuais longitudinais médias no lado externo do fio para os três raios de gabaritos e duas etapas de retorno elástico.



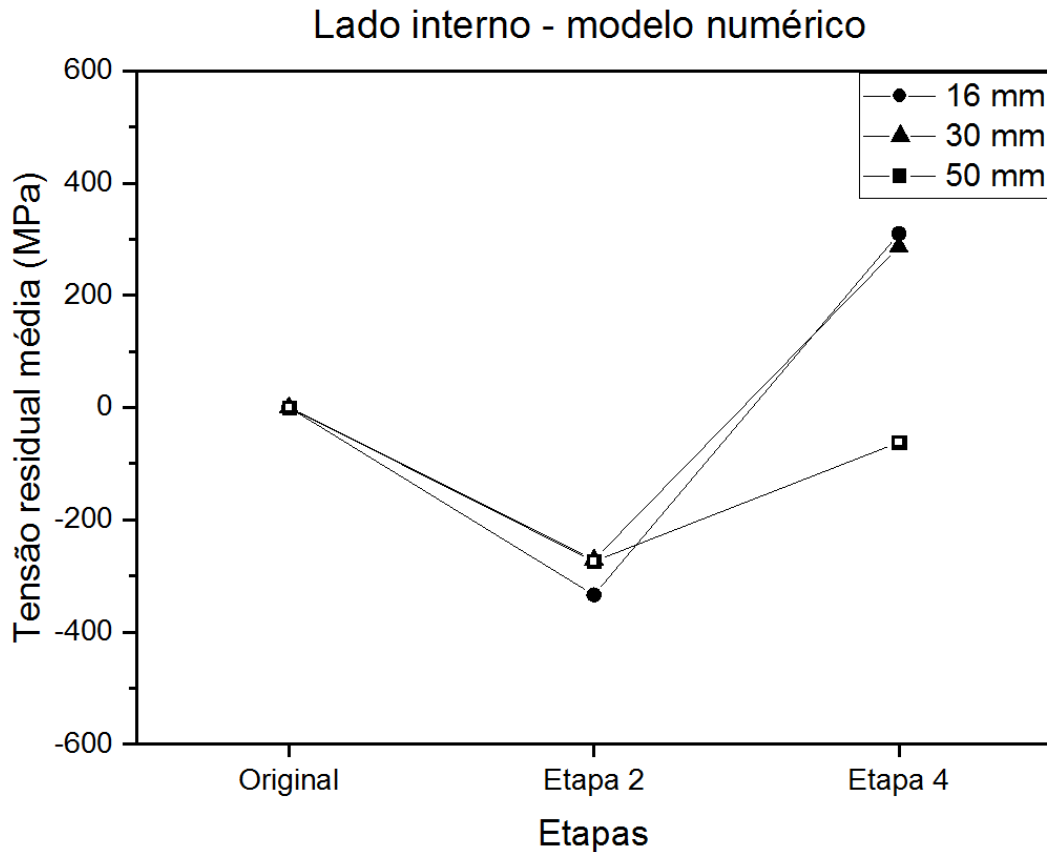
Fonte: A AUTORA, 2020

Partindo de um estado sem tensões residuais no fio, durante a primeira etapa de dobramento, o lado externo do fio desenvolve tensões residuais trativas. No primeiro retorno elástico (etapa 2), as tensões observadas foram de 415 MPa para o gabarito menor e de 300 MPa para o gabarito maior. Após o dobramento sobre o miolo do conector, na posição mais próxima possível ao enrolamento original, houve o segundo retorno elástico (etapa 4), onde as tensões residuais passaram a ser compressivas de -330 MPa e -310 MPa para os gabaritos de 16 mm e 30 mm, respectivamente, sendo que permaneceram trativas da ordem de 35 MPa para o gabarito de 50 mm.

A Figura 33 mostra o comportamento das tensões no lado interno do fio no modelo numérico. Observou-se que o dobramento do fio sobre o gabarito de controle de curvatura e retorno elástico, resultou na introdução de tensões residuais compressivas no lado interno do fio da ordem de -335 MPa para o gabarito de 16 mm, e de -270 MPa para os outros dois raios de gabaritos. Para o segundo retorno elástico

que corresponde à etapa 4, o maior gabarito permanece com tensões residuais compressivas de -60 MPa, enquanto os gabaritos de 30 e 16 mm apresentaram tensões trativas de 285 MPa e 310 MPa, respectivamente.

Figura 33 - Tensões residuais longitudinais médias no lado interno do fio para os três raios de gabaritos e duas etapas de retorno elástico.



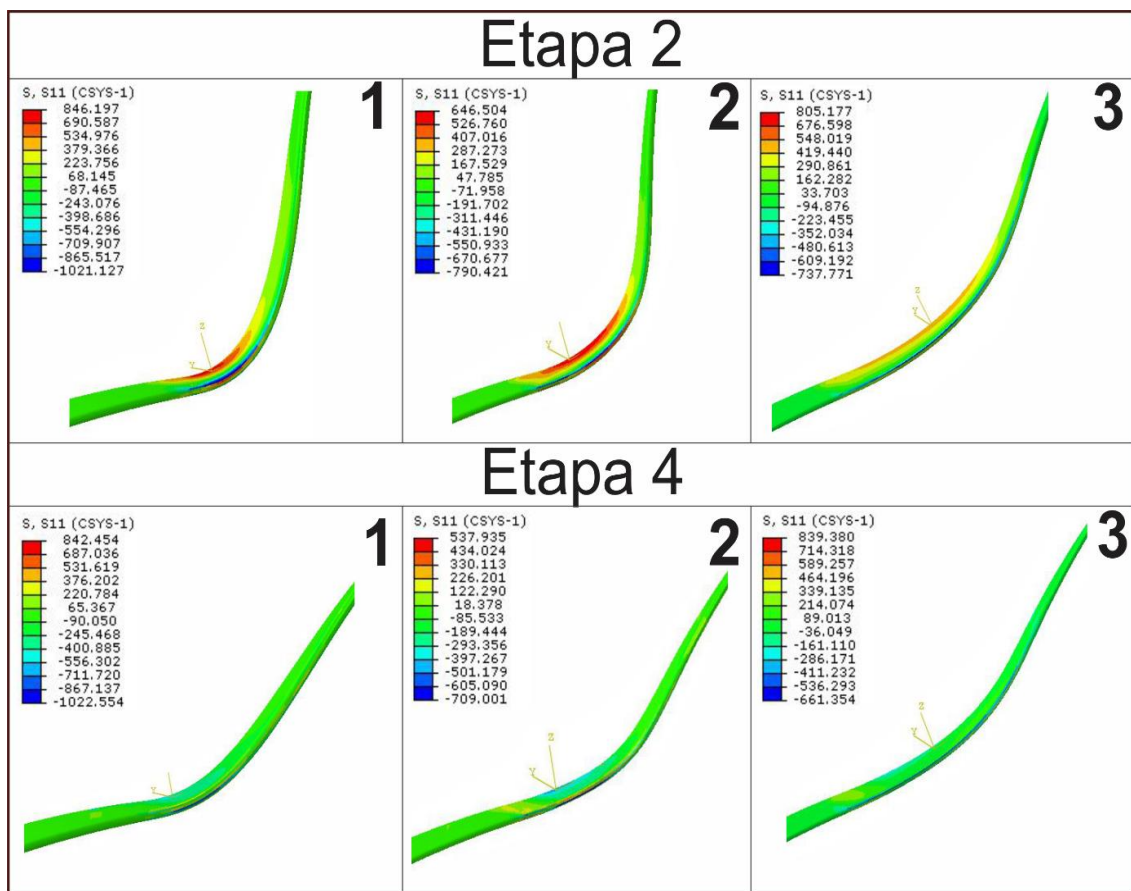
Fonte: A AUTORA, 2020

Através do modelo numérico deste trabalho e de outros como Shen *et al.* (2008), De Sousa *et al* (2013) e Campello (2014), constata-se que as etapas de dobramento sobre o gabarito de controle de curvatura (Etapa 1) e sobre o conector (Etapa 3) produziram tensões na direção de máxima principal e pelo critério de falha de Von Mises próximas ao limite de resistência do material, mesmo com diferentes raios de gabarito. Em todos os casos, assim como ocorre em campo para montagem do conector, o fio sofre uma grande deformação, independentemente do tamanho do gabarito utilizado, ao ser dobrado para que os operadores possam montar o conector adequadamente.

Observando os resultados encontrados, percebe-se que quando o gabarito utilizado é pequeno, como o de 16mm aqui estudado, o fio nem mesmo o contorna satisfatoriamente, de forma que o fio deforma com comportamento semelhante ao que teria sem nenhum tipo de gabarito de controle de curvatura. Isso também leva o fio a uma grande deformação plástica, ficando bastante diferente do formato original e apresentando tensões residuais mais proeminentes.

Outro ponto que pode ser visto através da simulação por elementos finitos é que, com a utilização de gabaritos maiores, as tensões residuais ficam distribuídas de maneira mais “suave” no fio. Já com a utilização de gabaritos menores, as tensões residuais além de serem de maior magnitude, ficam mais concentradas no centro da região de dobramento. A Figura 34 mostra esta distribuição de tensões residuais longitudinais no fio, calculadas pelo modelo numérico para os três raios de gabaritos, nas duas etapas de retorno elástico.

Figura 34 - Distribuição de tensões residuais longitudinais para os três gabaritos e duas etapas de retorno elástico, onde 1 – gabarito de 16mm, 2 – gabarito de 30mm e 3 – gabarito de 50mm.

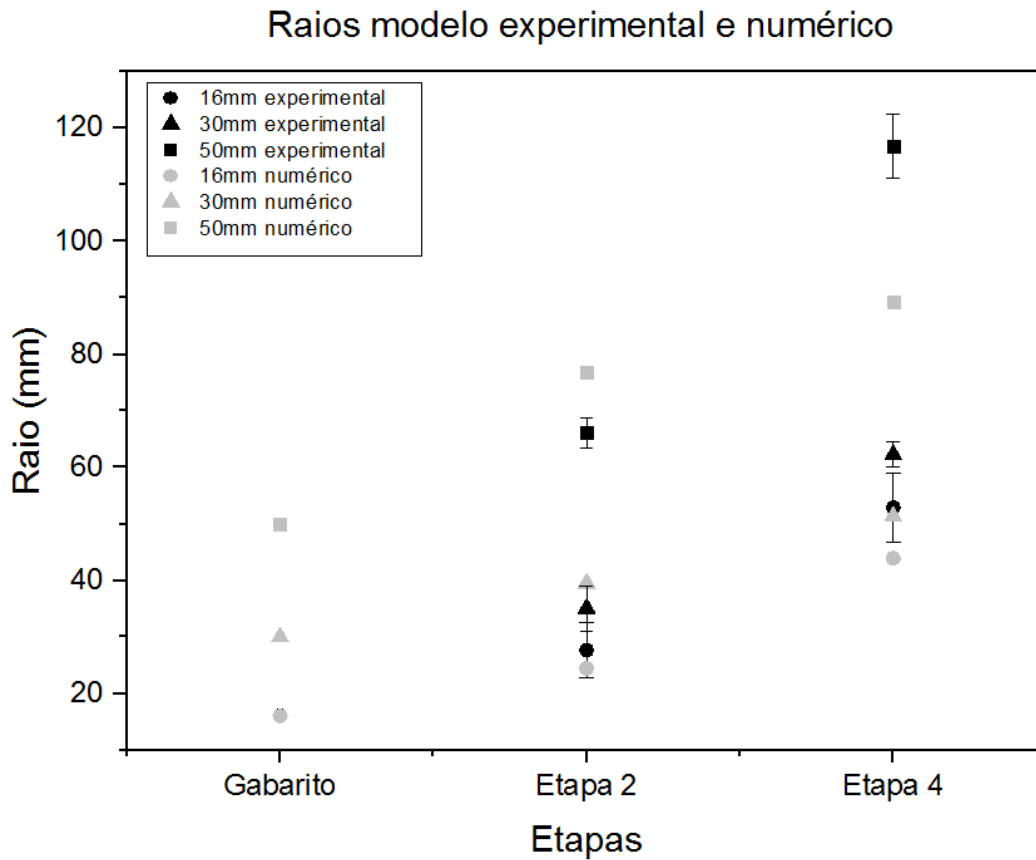


4.3 DISCUSSÃO

Tanto no experimento, quanto no modelo numérico, fica visível a influência do gabarito e da geometria helicoidal do fio nos resultados obtidos. Com essa geometria do fio, um dos lados deste, ao ser dobrado sobre o gabarito de controle de curvatura, forma um raio menor e concentra tensões residuais maiores, e parte do efeito se mantém, apesar do fio ser desdobrado até a posição mais próxima do enrolamento original.

Para melhor visualização, a Figura 35 mostra os raios obtidos no modelo experimental e numérico na mesma imagem, comparando os três raios de gabaritos nas duas principais etapas, juntamente com o desvio padrão demonstrado pela barra vertical. De maneira geral, os raios obtidos foram maiores para o modelo numérico na etapa 2, e maiores para o modelo experimental na etapa 4. Os fatos podem ser resultado de um dobramento mais acentuado no experimento ao encaixar os fios no dispositivo de contenção, bem como de uma pressão exercida em mais de um ponto para o fechamento da armaduras na etapa 4. Apesar de o modelo numérico tentar ser o mais fiel possível, a influência do operador tanto no experimento, quanto em uma montagem real, sempre existe. Observa-se também que no experimento há um desvio padrão considerável, ponto que não foi possível avaliar no modelo numérico, pois há apenas um fio final deformado proveniente de cada gabarito.

Figura 35 - Comparação entre os raios obtidos no modelo experimental e numérico para os três gabaritos e etapas 2 e 4, a barra vertical indica desvio padrão.

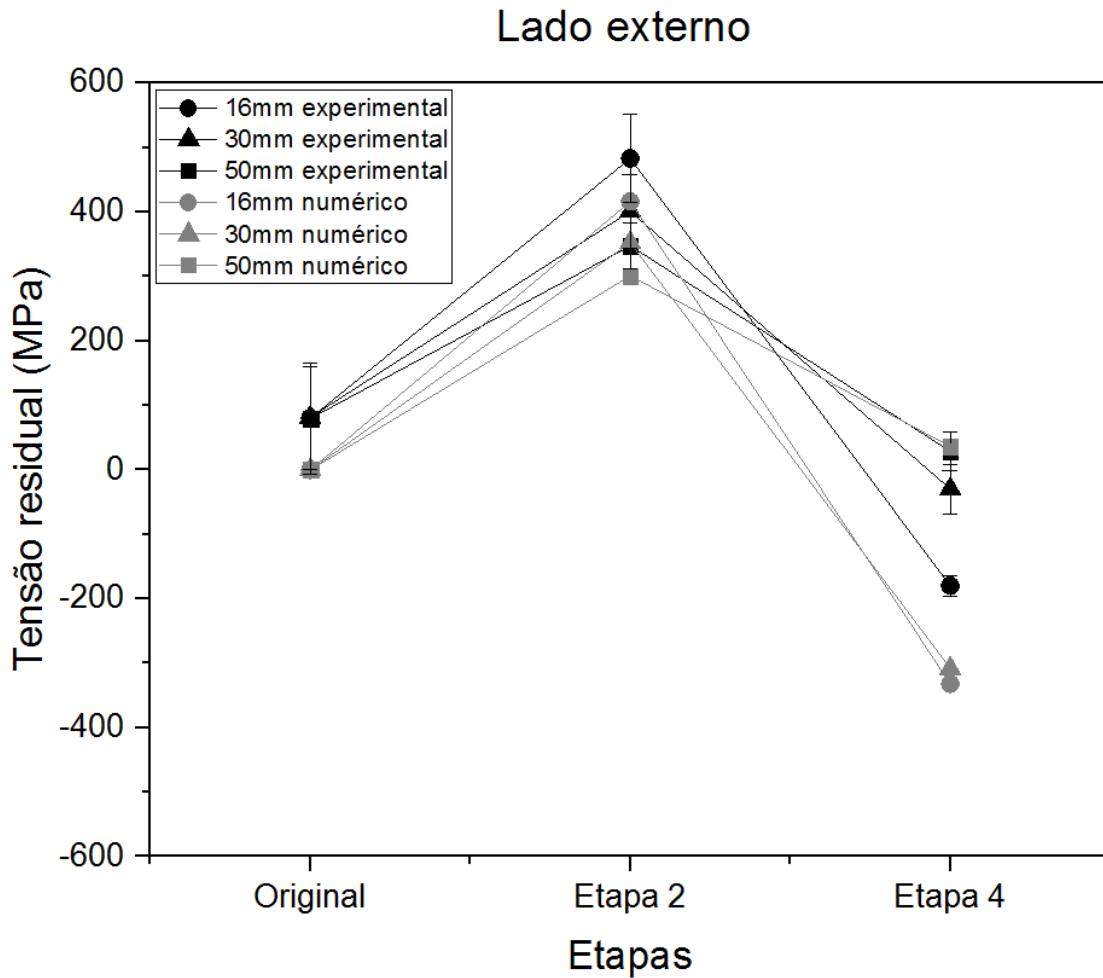


Fonte: A AUTORA, 2020

Há coerência na diferença encontrada nas tensões e raios residuais dentre a análise dos diferentes raios de gabaritos, o que reflete um comportamento semelhante. As tensões residuais percebidas na medição apresentam estados de tensão compressivos e trativos correspondentes no mesmo ponto em ambos os modelos.

Comparando as tensões residuais obtidas para o lado interno do fio nos dois modelos (Figura 36), observamos que a diferença de tensão residual na etapa 2 entre o modelo numérico e o modelo experimental é de valor semelhante à diferença de tensão residual inicial. Na etapa 4 os valores possuem comportamento discrepante, especialmente no que tange ao resultado do gabarito de 50mm, onde a diferença entre a tensão residual nos dois modelos foi quase nula, isto pode advir tanto por uma sobreposição dos efeitos, quando pelas já supracitadas diferenças que podem ocorrer durante a execução do experimento.

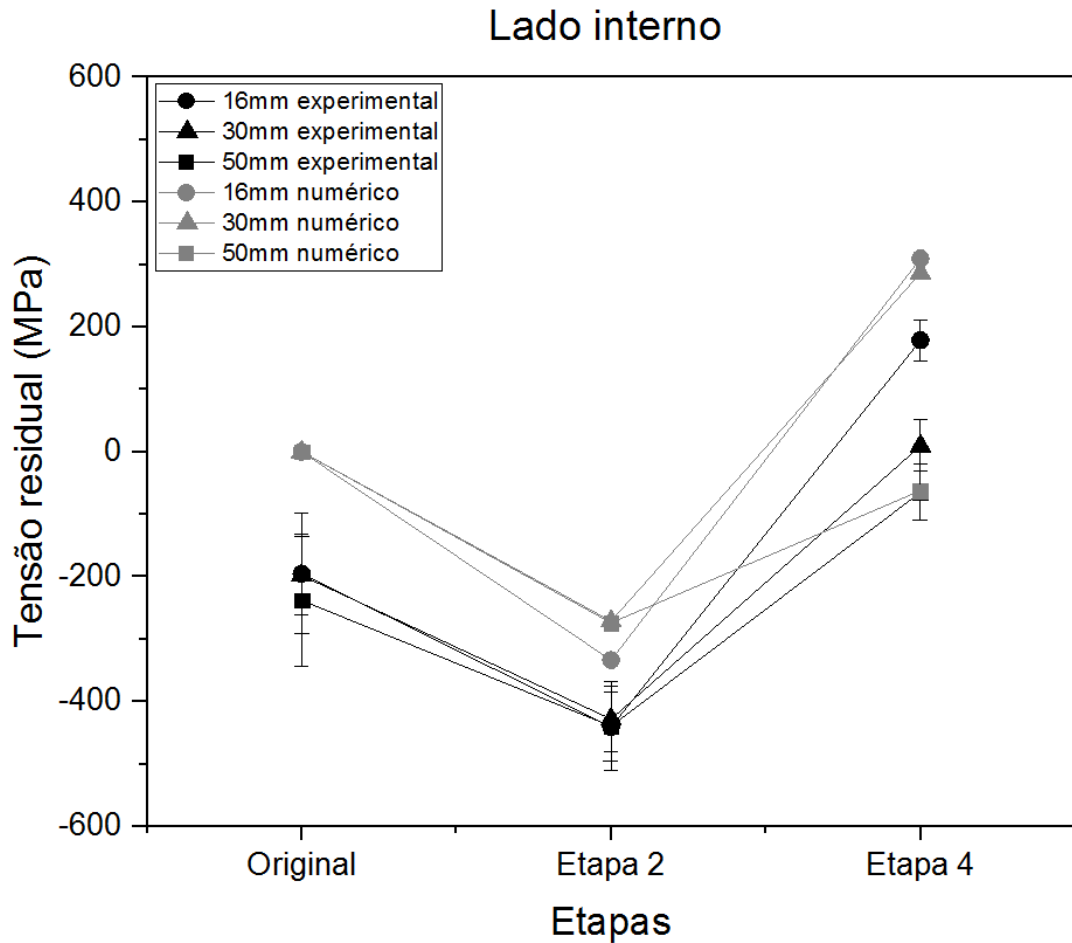
Figura 36 - Comparação entre as tensões residuais obtidas no lado externo do fio, no modelo experimental e numérico para os três gabaritos e etapas 2 e 4, a barra vertical indica desvio padrão.



Fonte: A AUTORA, 2020

Ao observar a comparação entre tensões residuais no lado interno do fio na Figura 37, mais uma vez a etapa 2 traz uma diferença entre o modelo experimental e numérico de valor semelhante à tensão residual inicial do experimento. O lado interno do fio na etapa 4 também apresenta comportamento semelhante ao lado externo, com a tensão residual para o gabarito de 50mm igual para os dois modelos estudados.

Figura 37 - Comparação entre as tensões residuais obtidas no lado interno do fio, no modelo experimental e numérico para os três gabaritos e etapas 2 e 4, a barra vertical indica desvio padrão.



Fonte: A AUTORA, 2020

Foi evidenciada uma diferença de tensões residuais longitudinais no perfil de medição dos pontos situados na seção transversal do fio. Em geral, os fios apresentaram uma tensão ligeiramente maior perto da borda do fio. Contudo, tal diferença é sutil de modo que é possível analisar a média global dos resultados de tensão residual.

O modelo experimental constatou a esperada mudança do estado de tensões nos fios, demonstrando o surgimento de uma tensão residual longitudinal, que é inversamente proporcional ao raio do gabarito de dobramento. O desempenho do modelo numérico corroborou com o comportamento do modelo experimental, assim como com modelos numéricos das etapas de dobramento apresentados pelos autores supracitados.

Como observação final e mais importante, os resultados indicaram que, com o aumento do raio do gabarito de controle de curvatura, ocorre um aumento do raio residual e, inevitavelmente, uma diminuição de magnitude das tensões residuais, bem como uma distribuição destas tensões de uma forma mais uniforme e “suave”.

Inferese então que a utilização de gabaritos maiores durante a montagem dos conectores em dutos flexíveis deve diminuir a concentração de tensões na entrada do conector, de modo que a sua vida em serviço seja maior.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou desenvolver um modelo experimental e numérico para a montagem do conector de campo com uma seção de duto flexível, relacionando diferentes raios de dobramento com a deformação e com as tensões residuais. As seguintes conclusões podem ser apresentadas:

O modelo experimental concebido no trabalho se mostrou coerente com aquele observado na montagem de conectores de campo convencionais. Foi possível observar as diferenças em relação ao raio desenvolvido e as tensões residuais, tanto no primeiro retorno elástico - após o dobramento sobre o gabarito de controle de curvatura - quanto na etapa final, quando o fio da armadura de tração fica em sua posição final de montagem.

O modelo numérico mostrou que, na etapa de dobramento sobre o gabarito, os valores de tensão máxima principal obtidos se aproximam dos limites de resistência do material para os diâmetros de gabarito ensaiados.

No retorno elástico, ficam visíveis as diferenças causadas pela variação do diâmetro do gabarito de controle de curvatura. Os gabaritos com maior diâmetro apresentaram uma distribuição de tensões menos concentrada na região do dobramento, diminuindo assim o efeito de concentração de tensões em pontos específicos, principalmente nas bordas do elemento.

Em concordância com os resultados esperados, as maiores tensões residuais foram observadas para o gabarito de menor diâmetro, levando à conclusão de que, à medida que o gabarito aumenta, diminuem as tensões residuais. O gabarito de menor raio não possibilita o contorno perfeito do fio por conta de suas dimensões reduzidas, levando a uma dobra mais aguda e a uma diferença expressiva da tensão residual em relação às demais.

Os modelos mostraram uma boa correlação entre os gabaritos empregados e seus respectivos resultados de raios e tensões residuais. Conforme previsto e observado em outros trabalhos, o aumento do raio do gabarito implica, sim, na ampliação do raio residual e diminuição das tensões residuais.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar simulação numérica desde o processo de enrolamento do fio durante a fabricação do duto flexível, para obter tensões residuais iniciais próximas as observadas.
- Construir um modelo experimental do processo de dobramento e corte dos fios da armadura de tração com a utilização de *strain gages* na superfície dos fios para verificar a variação das tensões.
- Realizar cálculos de vida em fadiga para dutos flexíveis, utilizando os valores de tensões residuais encontrados, e comparando diferentes raios de gabarito.
- Construir modelos numéricos mais abrangentes, utilizando-se diversas espessuras de fio de armadura de tração, e raios de gabaritos, bem como demais parâmetros.
- Analisar as tensões durante o processo de dobramento e desdobramento dos fios da armadura de tração, através de sistema de vídeo extensometria.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API RP 17B**: Recommended Practice for Flexible Pipe. 4th ed. Washington, 2008. 226p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API 17J**: Specification for Unbonded Flexible Pipe. 4th ed. Washington, 2014. 98p.

AXELSSON, G.; SKJERVE, H. **Flexible riser carcass collapse analyses: sensitivity on radial gaps and bending**. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARTIC ENGINEERING (OMAE), 33., 2014, San Francisco. Anais... EUA: ASME, 2014. OMAE2014-23922, V06AT04A059.

BAI, Q.; BAI, Y.; RUAN, W. **Advances in pipes and pipelines: Flexible Pipes**. 1st. ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2017.

BARRETT, R. T. **Fastener design manual**. NASA RP-1228. Washington, DC: NASA, 1990.

BENIRSCHKE, C. **Análise de tensões em conectores de linhas flexíveis**. 2014. 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BORGES, M.F. *et al.* **New methodology for flexible riser end-fittings fatigue assessment based on remote S-N curves**. In: OMAE, 34., St John's, Canada. Anais... EUA: ASME, 2015. V05BT04A025.

BRAESTRUP, M. *et al.* **Design and installation of marine pipelines**. 1st ed. Oxford: Blackwell Science, 2005.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of material science and engineering an integrated approach**. 4th ed. USA: John Wiley & Sons, 2012

CAMPELLO, G. *et al.* **A novel concept of flexible pipe end fitting: tensile armor foldless assembly**. In: OMAE, 31., Rio de Janeiro. Anais... EUA: ASME, 2012. p. 413-421.

CAMPELLO, G. C. **Metodologia de projeto para o sistema de ancoragem de conectores de dutos flexíveis e proposição de novas tecnologias**. 2014. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

CAMPELLO, G. C.; DE SOUSA, J. R. M.; VARDARO, E. **An Analytical Approach to Predict the Fatigue Life of Flexible Pipes Inside End Fittings**. In: OTC, 2016, Houston, USA. Anais... Dallas: OnePetro, 2016.

DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA. **Abaqus - Analysis User's Manual: Volume 5: Prescribed Conditions, Constraints & Interactions**. Providence, Rhode Island: Dassault Systèmes, 2012. v. IV

DE SOUSA, J. R. M. **Análise local de linhas flexíveis pelo método dos elementos finitos**. 2005. 746p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

DE SOUSA, J. R. M. de *et al.* **A FE model to predict the stress concentration factors in the tensile armor wires of flexible pipes inside end fittings**. In: OMAE, 32., 2013, Nantes, França. Anais... EUA: ASME, 2013. V04BT04A016.

DE SOUSA, J. R. M. de *et al.* **Bending analysis of a flexible pipe with broken tensile armor wires**. In: OMAE, 34., 2015, St. John's, Canadá. Anais... EUA: ASME, 2015. V05AT04A038.

DE SOUSA, J. R. M. de *et al.* **Fatigue analyses of a flexible riser considering end fitting effects**. In: OMAE, 36., 2017, Trondheim, Norway. Anais... EUA: ASME, 2017. V05AT04A019

Det Norske Veritas (DNV). **DNVGL-RP-F119: Thermoplastic composite pipes**. DNV GL, 2015. 141 p. Disponível em: <<https://www.dnvgl.com/oilgas/download/download-dnvgl-rp-f119.html>>.

DO, A.T. *et al.* **Design of novel solution of flexible pipe for offshore oil offloading transfer**. In: OMAE, 33., 2014, San Francisco, USA. Proceedings... EUA: ASME, 2014.

DO, A. T.; BERNARD, G.; HANONGE, D. **Carbon Fiber Armors Applied to Presalt Flexible Pipe Developments**. In: Offshore Technology Conference (OTC), 2013, Houston, USA. Anais... Dallas: OnePetro, 2013.

DONG, L. *et al.* **The tensile armour behaviour of unbonded flexible pipes close to end fittings under axial tension**. Ships and Offshore Structures, v. 11, n. 5, p. 445-460, jul. 2016.

ECHTERMEYER, A; STEUTEN, B. **Thermoplastic Composite Riser Guidance Note**. In: OTC, 2013, Houston, USA. Anais... Dallas: OnePetro, 2013.

FERGESTAD, D.; LØTVEIT, S. A. **Handbook on design and operation of flexible pipes**. 3rd ed. Trondheim, Norway: MARINTEK/NTNU/4Subsea, 2014.

FERNANDO, U.S. *et al.* **Measurement of residual stress shakedown in pressure/tensile armour wires of flexible pipes by neutron diffraction**. In: OMAE, 34., 2015, St. John's, Canada. Anais... EUA: ASME, 2015. V05AT04A035.

JHA, V. *et al.* **Optimized Hybrid Composite Flexible Pipe for Ultra-Deepwater Applications**. In: OMAE, 34., 2015, St. John's, Canada. Anais... EUA: ASME, 2015. V05AT04A018.

KANDIL, F. A. *et al.* **A review of residual stress measurement methods: A guide to technique selection.** Teddington, Middlesex, UK: NPL Materials Centre, 2001. 45 p.

KLEIMAN, J.; KUDRYAVTSEV, Y. **Residual stress management in welding residual stress measurement and improvement treatments.** In: OMAE, 31., Rio de Janeiro. Anais... EUA: ASME, 2012. p. 413-421.

LAMEF. **LAMEF - Laboratório de Metalurgia Física - Engenharia de Materiais.** 2018. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/lamef/trabalho/engenharia_materiais.html>. Acesso em: 30 out. 2018.

LEROY, J.-M. *et al.* **Stress assessment in armour layers of flexible risers.** In: OMAE, 29., Shangai. Anais... EUA: ASME, 2010. p. 951-960.

LOHE, D.; LANG, K. H.; VÖHRINGER, O. **Residual Stresses and Fatigue Behaviour.** In: TOTTEN, George E.; HOWES, Maurice A. H.; INOUE, Tatsuo (Eds.). Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. Materials Park, Ohio, USA: ASM Internacional, 2002. p. 27–53.

LOPES, D. G. **Avaliação das tensões residuais na montagem de conectores em armaduras de tração de dutos.** 2013. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2013.

MARINHO, M. G. *et al.* **Surface monitoring techniques for a continuous flexible riser integrity assessment.** In: OTC, 2007, Houston, USA. Anais... Dallas: OnePetro, 2007.

MIYAZAKI, M. N. R. **Stress analysis of a flexible pipe tensile armor wire during and after the end-fitting mounting.** 2015. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

NIELSEN, K. G. *et al.* **Application of a new wire carcass design for prevention of singing behavior in flexible risers.** In: OTC, 2011, Houston, USA. Anais... Dallas: OnePetro, 2011.

PADILHA, J. A. P. **Análise estrutural de riser flexível com armaduras de tração em titânio.** 2009. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PETROBRAS. **Infográfico: Tipos de plataformas.** Disponível em: <www.petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas>. Acesso em: 17 maio. 2017.

PINHEIRO, B. *et al.* **X-ray diffraction study of microstructural changes during fatigue damage in steel pipelines.** In: OMAE, 31., Rio de Janeiro. Anais... EUA: ASME, 2012. p. 295-304.

ROSSINI, N. S. et al. Methods of measuring residual stresses in components. **Materials and Design**, Dublin, v. 35, p. 572–588, mar. 2012.

RUUD, C. Measurement of Residual Stresses. In: **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. Materials Park, Ohio, USA: ASM Internacional, 2002. p. 99–117.

SHEN, Y. *et al.* **Development of the end fitting tensile wires fatigue analysis model: sample tests and validation in an unbonded flexible pipe**. In: OTC, 2008, Houston, USA. Anais... Houston: OnePetro, 2008.

SHEN, Y., JUKES, P. **Technical challenges of unbonded flexible risers in HPHT and deepwater operations**. In: International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), 25., Kona. Anais... Richardson: OnePetro, 2015, p. 343-349.

VARGAS, F. A. *et al.* **Experimental comparison of tensile armor wires using strain gages and fiber bragg grating techniques**. In: OMAE, 33., San Francisco. Anais... Nova Iorque: ASME, 2014. V06AT04A050

VAZ, M.A., RIZZO, N. A. S. **A finite element model for flexible pipe armor wire instability**. *Marine Structures*, Nova Iorque, v. 24, n. 3, p. 275–291, jul. 2011.

VIDIGAL, J. *et al.* **Impact of H₂S consumption and anti-H₂S layer on flexible pipe design**. In: OTC, 2017, Houston. Anais... Houston: OnePetro, 2017. OTC-27733-MS.

WANG, W.; CHEN, G. **Analytical and numerical modeling for flexible pipes**. *China Ocean Engineering*. v.35, n.4, p.737-746, dez. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13344-011-0059-9>>.

WILKINS, J. **Qualification of composite pipe**. In: OTC, 2016, Houston. Anais... Houston: OnePetro, 2016. OTC-27179-MS.